

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ESTUDIO, ANÁLISIS CUALITATIVO-CUANTITATIVO Y  
DIMENSIONAMIENTO DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO  
DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico**

**AUTOR:**

Marco Elias Antonio Yovera Cortez

**ASESOR:**

Dr. Carlos Alberto Paragua Macuri


**Lima, junio de 2025**

## Informe de Similitud

Yo, Carlos Alberto Paragua Macuri, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería – Sección Electricidad y Electrónica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: “ESTUDIO, ANÁLISIS CUALITATIVO-CUANTITATIVO Y DIMENSIONAMIENTO DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS”, del autor Marco Elias Antonio Yovera Cortez, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 17%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 22/06/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Miguel, 22 de junio del 2025

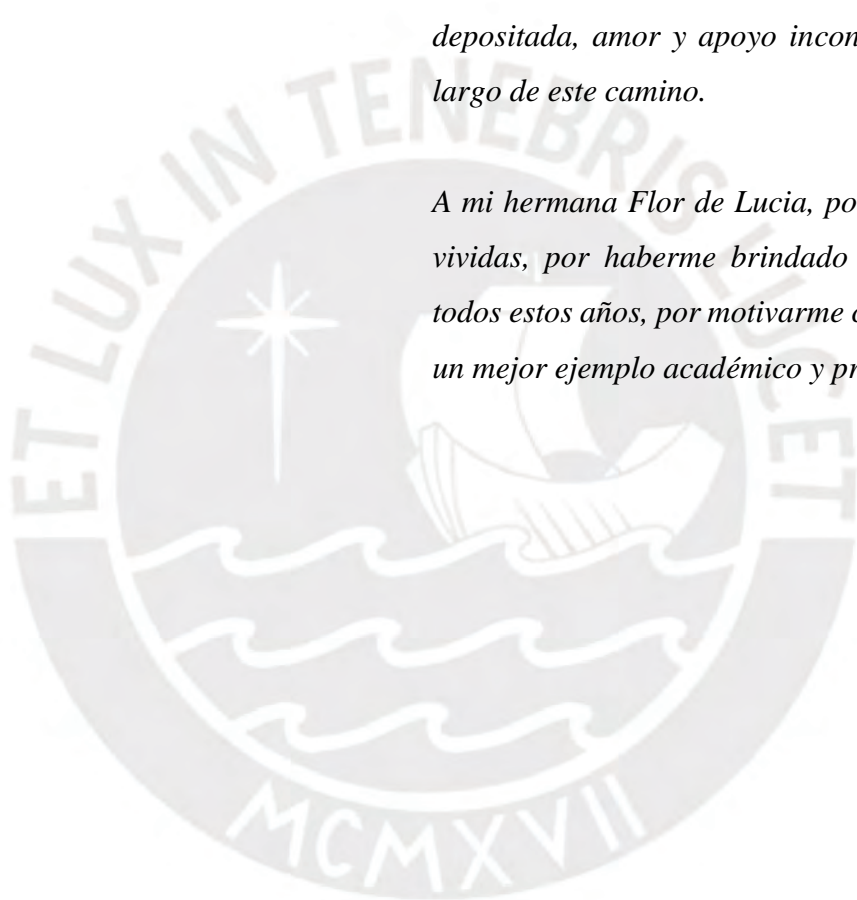
Apellidos y nombres del asesor: Paragua Macuri, Carlos Alberto	
DNI: 41843144	Firma 
ORCID: 0009-0005-1695-0857	

## **Dedicatoria**

*A Dios por hacer de su voluntad el camino, los obstáculos y metas que he recorrido, por llenarme de fortaleza y temple en los momentos donde más lo necesité a lo largo de este reto.*

*A mis padres, Lucia y Marco, por la confianza depositada, amor y apoyo incondicional a lo largo de este camino.*

*A mi hermana Flor de Lucia, por las alegrías vividas, por haberme brindado su compañía todos estos años, por motivarme cada día a ser un mejor ejemplo académico y profesional.*



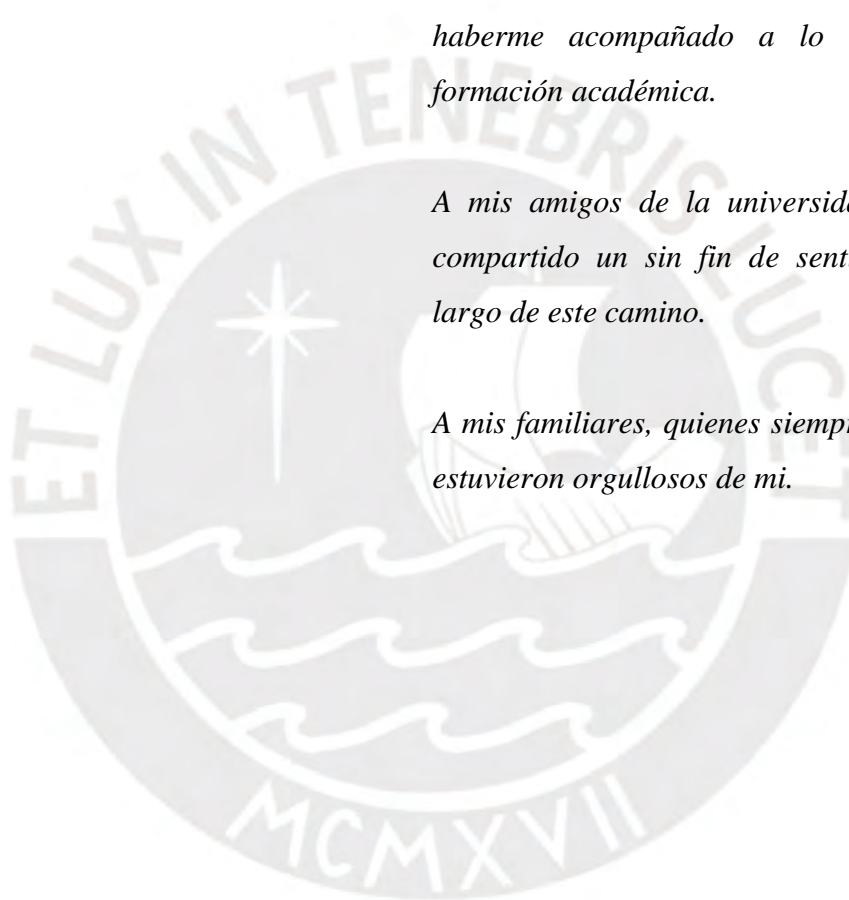
## Agradecimientos

*A mi asesor Dr. Carlos Paragua, por su invaluable guía, paciencia y apoyo a lo largo de este proyecto, por su dedicación y compromiso para con mi persona.*

*A mis profesores de la especialidad, por haberme acompañado a lo largo de mi formación académica.*

*A mis amigos de la universidad por haber compartido un sin fin de sentimientos a lo largo de este camino.*

*A mis familiares, quienes siempre confiaron y estuvieron orgullosos de mi.*



## RESUMEN

En el contexto de la problemática medioambiental en la actualidad, se consideran diversas alternativas para abordar la eficiencia energética y promover el uso de energías limpias, entre estas tecnologías se contemplan los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, es crucial analizar y determinar el impacto medioambiental asociado a esta tecnología para justificar su viabilidad como solución. Esta tesis tiene como objetivo realizar un análisis cualitativo y cuantitativo, utilizando el concepto de EPBT (*Energy Payback Time*) y el cálculo de la huella de carbono, para evaluar el desempeño medioambiental de los paneles fotovoltaicos, en particular, al final de la vida útil de estos.

La metodología que se utiliza para el estudio se divide en tres etapas. En la primera etapa, se realiza un análisis cualitativo del estado del arte del reciclaje de paneles fotovoltaicos, considerando tanto el proceso general como los subprocesos específicos involucrados. Se presta especial atención a la tecnología de los paneles más próximos a ser reciclados, ya que son el foco principal de interés.

Los resultados obtenidos revelan que el tiempo necesario para que un panel fotovoltaico pueda suplir la energía utilizada en su reciclaje es relevante y no debe ser pasado por alto en relación con su período de vida útil.

Dado que el reciclaje de paneles fotovoltaicos es un tema en constante crecimiento, esta investigación es de suma importancia y utilidad, siendo un referente para trabajos futuros en la misma problemática. Además, se espera que la temática adquiera una gran relevancia en los próximos años debido al crecimiento del reciclaje de paneles.

Aunque la tesis se centra en el reciclaje de paneles solares, es importante tener en cuenta que estos no funcionan de manera aislada, sino que están acompañados de otros componentes electrónicos, como inversores, baterías y controladores de carga, que también tienen un impacto medioambiental asociado a su ciclo de vida. Sin embargo, este estudio tiene por enfoque exclusivamente los paneles fotovoltaicos como tecnología individual. Además, se resalta que el análisis se centrará principalmente en los paneles de las primeras generaciones, ya que son los más abundantes en la actualidad y serán los próximos en ser reciclados.

Palabras clave: *balance energético, ciclo fotovoltaico, gases de efecto invernadero, huella de carbono, paneles fotovoltaicos*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	i
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1. CAPÍTULO 1 : PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL EN LOS PROCESOS EMERGENTES DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Contexto histórico .....</b>	<b>3</b>
1.1.1. Terminología.....	3
1.1.2. Paneles Fotovoltaicos.....	5
<b>1.2. Marco Problemático .....</b>	<b>11</b>
1.2.1. Problemática ambiental.....	11
1.2.2. Reciclaje.....	16
<b>1.3. Relevancia de la investigación.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4. Objetivos .....</b>	<b>19</b>
1.4.1. Objetivo principal .....	19
1.4.2. Objetivos específicos .....	19
<b>2. CAPITULO 2: PLANTEAMIENTO TEÓRICO PARA EL ANÁLISIS CUALITATIVO-CUANTITATIVO DE LOS PROCESOS DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1. Paneles fotovoltaicos .....</b>	<b>20</b>
2.1.1. Estructura de paneles fotovoltaicos .....	20
2.1.2. Presencia de materiales en paneles PV .....	21
2.1.3. Silicio en paneles fotovoltaicos .....	23
2.1.4. Principio de funcionamiento .....	23
2.1.5. Circuito equivalente y potencia asociada.....	25
2.1.6. Mapas de Irradiancia.....	26
2.1.7. Eficiencia de paneles fotovoltaica .....	27

<b>2.2. Reciclaje de paneles Fotovoltaicos.....</b>	<b>29</b>
2.2.1. Estado del arte .....	29
2.2.2. Economía circular .....	34
<b>2.3. Impacto medioambiental.....</b>	<b>35</b>
2.3.1. EPBT .....	35
2.3.2. Huella de carbono .....	35
2.3.3. Factor de conversión .....	36
<b>3. CAPÍTULO 3: BALANCE ENERGÉTICO Y DIMENSIONAMIENTO DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. Metodología para el análisis.....</b>	<b>38</b>
3.1.1. Descripción y consideraciones previas .....	38
3.1.2. Casos de estudio para análisis .....	38
<b>3.2. Análisis cuantitativo.....</b>	<b>40</b>
3.2.1. Análisis cuantitativo de procesos .....	40
3.2.2. Balance energético del proceso de reciclaje .....	47
<b>3.3. Dimensionamiento del Impacto medioambiental.....</b>	<b>48</b>
3.3.1. Cálculo de huella de carbono .....	48
<b>4. CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1. Conclusiones .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2. Perspectivas .....</b>	<b>55</b>
<b>PRODUCCIÓN CIENTÍFICA .....</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo Fotovoltaico .....	5
Figura 2: Costo promedio (US\$/W) por tamaño del sistema (KW) .....	7
Figura 3: Tendencia de evolución de costos (US\$/Watt) .....	7
Figura 4: Sistemas Fotovoltaicos On-Grid .....	10
Figura 5: Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid.....	10
Figura 6: Sistemas Fotovoltaicos Híbridos .....	11
Figura 7: Unidades de AEE puestos en el mercado en España en 2019 .....	17
Figura 8: Estructura de panel fotovoltaico .....	20
Figura 9: Materiales en el panel PV (1era gen.) .....	22
Figura 10: Materiales en el panel PV (2da gen.) .....	22
Figura 11: Ilustración efecto fotoeléctrico .....	24
Figura 12: Efecto Fotovoltaico .....	24
Figura 13: Representación eléctrica de una celda PV.....	25
Figura 14: Graficas V vs I en función de la Irradiancia.....	26
Figura 15: Mapa de Irradiancia del Perú año 2019 .....	27
Figura 16: Proceso general de reciclaje de paneles PV .....	31
Figura 17: Ruta de reciclaje de paneles PV .....	41
Figura 18: EPJ Photovoltaics Journal .....	57
Figura 19: IEEE International Humanitarian Technologies Conference 2024 .....	57
Figura 20: 2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON).....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Costo de paneles solares en el mercado local .....	8
Tabla 2: Materiales dentro de panel PV .....	30
Tabla 3: Tipos de delaminación y ratios de separación .....	33
Tabla 4: Procesos de reciclaje y porcentaje de recuperación .....	34
Tabla 5: Cuadro comparativo de casos de estudio .....	40
Tabla 6: Consumo energético en la etapa de desmantelamiento .....	43
Tabla 7: Consumo energético en la etapa de delaminación mecánica .....	44
Tabla 8: Consumo energético en la etapa de delaminación térmica .....	45
Tabla 9: Consumo energético en la etapa de recuperación de materiales .....	46
Tabla 10: Consumo energético en la etapa de clasificación .....	46
Tabla 11: Consumo energético en la etapa de lixiviación .....	47
Tabla 12: Energy Payback Time en casos de estudio .....	47
Tabla 13: Huella de carbono por desmantelamiento .....	48
Tabla 14: Huella de carbono por delaminación térmica .....	49
Tabla 15: Huella de carbono por proceso de delaminación general .....	50
Tabla 16: Huella de carbono por recuperación de materiales .....	50
Tabla 17: Huella de carbono por clasificación .....	50
Tabla 18: Huella de carbono por lixiviación .....	50
Tabla 19: Huella de carbono total por caso .....	51

# INTRODUCCIÓN

La creciente problemática ambiental ha generado la necesidad de buscar soluciones sostenibles en diversos sectores. En este contexto, el reciclaje de paneles fotovoltaicos ha surgido como una alternativa prometedora para abordar tanto la eficiencia energética como la reducción de emisiones contaminantes. Sin embargo, es fundamental examinar detenidamente el impacto ambiental asociado a esta tecnología antes de considerarla como una solución definitiva.

El problema planteado se centra en determinar si los paneles fotovoltaicos son realmente una fuente de energía limpia y una respuesta adecuada a la problemática ambiental actual. Además, es necesario analizar la viabilidad y la sostenibilidad del proceso de reciclaje de paneles fotovoltaicos en la actualidad.

Los objetivos de esta investigación se dividen en tres etapas. En primer lugar, se llevará a cabo un análisis cualitativo de los procesos de reciclaje existentes. En segundo lugar, se realizará un balance energético del proceso de reciclaje para evaluar su eficiencia. Por último, se llevará a cabo una evaluación del impacto ambiental del proceso de reciclaje de paneles fotovoltaicos, basándose en la huella de carbono asociada. El propósito de este trabajo de tesis es contribuir al conocimiento científico sobre el impacto ambiental del reciclaje de paneles fotovoltaicos y servir como una guía para la toma de decisiones informadas en cuanto a la elección de fuentes de energía sostenibles.

La justificación de esta investigación radica en la relevancia creciente del reciclaje de paneles fotovoltaicos, que aún se encuentra en proceso de desarrollo. Esta tesis resulta de suma importancia y utilidad, ya que puede servir como referencia para futuros trabajos en el campo. Además, dado que el reciclaje de paneles fotovoltaicos será una temática cada vez más importante en los próximos años, este estudio contribuirá a abordar los desafíos relacionados con el reciclaje de paneles que se avecinan.

La estructura de la tesis se divide en cuatro capítulos principales. El primer capítulo abordará la problemática energética y medioambiental, contextualizando la importancia del reciclaje de paneles fotovoltaicos. El segundo capítulo se centrará en el planteamiento teórico y el análisis cualitativo de los procesos de reciclaje existentes. El tercer capítulo se dedicará al análisis

cuantitativo, incluyendo el cálculo del EPBT (Energy Payback Time) o tiempo de retorno energético de los procesos de reciclaje y el cálculo de la huella de carbono asociada. Finalmente, el cuarto capítulo presentará las conclusiones obtenidas y las perspectivas futuras de investigación.

Esta investigación pretende proporcionar un análisis exhaustivo del reciclaje de paneles fotovoltaicos, brindando información relevante para el campo de la energía sostenible y sentando las bases para futuras investigaciones y decisiones informadas en relación con el reciclaje de paneles fotovoltaicos.



# **1. CAPÍTULO 1 : PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL EN LOS PROCESOS EMERGENTES DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS**

## **1.1. Contexto histórico**

Para poder comprender de manera idónea la problemática detrás de las tecnologías emergentes de los procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos, es necesario tomar en consideración el contexto general de esta tecnología, permitiendo conocer su contexto histórico, mercado actual y disponibilidad. Por otro lado, una revisión de los términos a utilizar a lo largo del manuscrito permitirá un mejor desarrollo de los conceptos a revisar.

### **1.1.1. Terminología**

#### **Irradiancia solar**

Se denomina irradiancia a la cantidad de potencia por unidad de área producida por la radiación solar recibida en el exterior de la atmósfera de la tierra, en una superficie de esta; su unidad de medida son los  $W/m^2$  [1].

#### **Efecto fotoeléctrico**

El efecto fotoeléctrico consiste en la propiedad de ciertos materiales, como los semiconductores, por ejemplo, para emitir fotones tras ser excitados con diversas fuentes de energía, como por ejemplo energía solar. Este efecto puede darse de manera natural cuando algunas sustancias son expuestas a radiación ultravioleta o radiación solar; una de las aplicaciones de este efecto es el efecto fotovoltaico para la generación de energía eléctrica [2].

#### **Celda fotovoltaica**

Es el dispositivo encargado de la transformación directa de energía solar en energía eléctrica; en la actualidad, representan una fuente de energía renovable con gran demanda [3].

#### **Panel Fotovoltaico**

Panel conformado de celdas fotovoltaicas, dispositivo construido con celdas fotovoltaicas, en las que se da el efecto fotoeléctrico produciendo una diferencia de potencial tras la excitación de radiación solar; generalmente se usan en serie a fin de obtener diferencias de potencial mayores [4].

## **Efecto Invernadero**

Efecto que consiste en la emisión de radiación infrarroja a partir de la radiación terrestre emitida desde la superficie de la tierra hacia la atmósfera; los agentes que se encargan de este efecto son: los gases de efecto invernadero, las nubes y en menor medida los aerosoles. Una proporción ideal de estos agentes es necesaria para permitir la vida en la tierra, mientras que una mayor concentración de estos contribuye al aumento de la temperatura en la superficie y en la troposfera [1]

## **Gases de efecto Invernadero (GEI)**

Los gases de efecto invernadero (GEI) corresponden a los gases que absorben la radiación de la superficie y emiten radiación infrarroja ocasionando así el efecto; los gases de efecto invernadero primarios son: Vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ), metano ( $CH_4$ ) y el ozono ( $O_3$ ) [1].

## **Huella de carbono**

La huella de carbono se denomina a la unidad de medida correspondiente a la emisión de los gases de efecto invernadero involucrados en determinada actividad y por determinado individuo ya sea por efecto directo o indirecto, se mide en unidad de masa de  $CO_2$  [5]

## **EPBT**

Energy Payback Time se define como el período requerido para que un sistema de energía renovable genere la misma cantidad de energía que fue usada para producir el sistema, incluyendo además la energía usada durante la gestión del mismo al final de su vida útil [6]

## **Ciclo Fotovoltaico**

Se denomina ciclo fotovoltaico, o cadena fotovoltaica, al ciclo de vida del panel fotovoltaico a lo largo de su uso, abordando los procesos desde la instalación de los mismos hasta la gestión al final de su vida útil; por tanto, se identifican 4 subprocesos o etapas involucradas en el ciclo fotovoltaico: Producción del panel fotovoltaico, transporte, instalación y uso, y gestión al final de su vida útil [7]. Asimismo, es posible encontrar bibliografía con una diferente disposición o denominación en las etapas del ciclo fotovoltaico, no obstante, los conceptos sobre los subprocesos son los mismos.

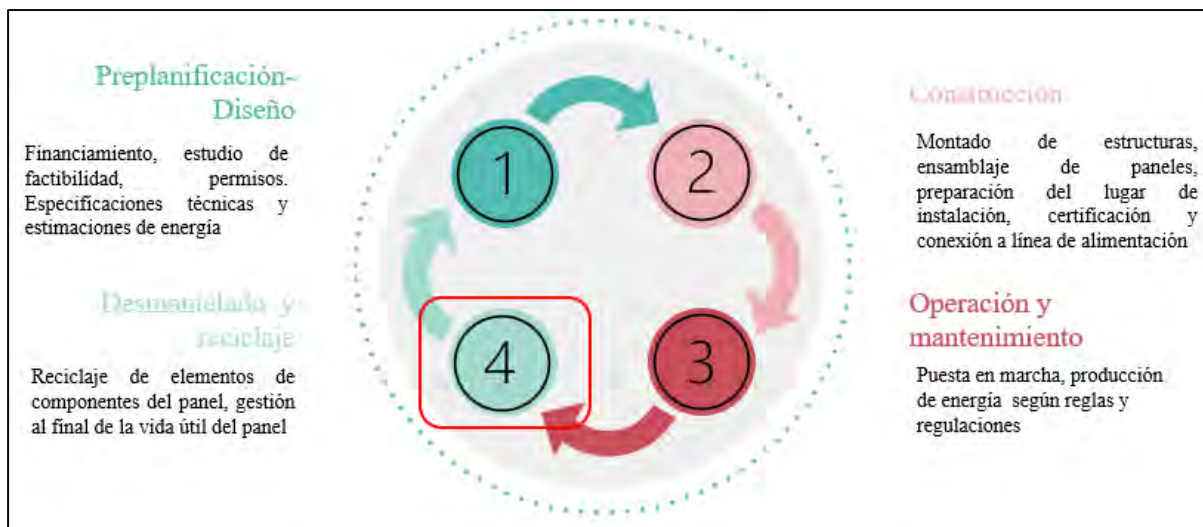


Figura 1: Ciclo Fotovoltaico[8]

### 1.1.2. Paneles Fotovoltaicos

Desde hace más de 3 décadas, el crecimiento en la producción de paneles fotovoltaicos (PV), ha crecido a una tasa de 37% anual [9] y en particular en los últimos años se ha llegado a picos de producción, llegando a los 1400 GW de capacidad de producción al primer trimestre del año 2024[10], algunas características que sustentan esta demanda son su disponibilidad y presencia en el mercado, costes de mantenimiento e instalación y los beneficios asociados al aprovechamiento de energía solar como fuente renovable. Este hecho se puede asociar *a priori* como un evidente progreso en la distribución, demanda y uso de energías sustentables; no obstante, resulta de suma relevancia evaluar el impacto medioambiental asociado al uso de esta tecnología. En la actualidad, el estado del arte, la documentación y los estudios vigentes que analizan el impacto de estos dispositivos a lo largo y final de su vida útil resultan muy limitadas e incluso inexistentes. Por tanto, en primera instancia, también resulta complicado justificar o no el uso de estos dispositivos en determinadas circunstancias. En ese sentido, el propósito del presente capítulo es abordar esta problemática mediante el entendimiento de esta y finalmente evidenciando la problemática específica.

#### 1.1.2.1. Origen y evolución

Con motivo de comprender la problemática energético-ambiental detrás del consumo y uso de paneles PV es conveniente presentar el marco histórico que envuelve esta tecnología.

Es bien sabido que la energía solar ha sido un recurso de suma importancia para el desarrollo de una vasta cantidad de herramientas y aplicaciones a lo largo de la historia humana; por ello siempre ha sido un objeto de estudio de sumo interés.

Es así como, en el año 1839 en Francia, mientras se experimentaba con celdas electrolíticas construidas por pares de electrodos en una solución electro-conductiva, se constató que, conforme estos electrodos eran expuestos a una fuente de luz radiante, la electricidad que fluía entre estos aumentaba y que podría ser aprovechable, es así que se descubre el efecto fotoeléctrico y con ello, las bases del funcionamiento de los paneles PV [11].

Para el año 1873, se descubrió que el selenio poseía un potencial foto conductor, 3 años después, en 1876, se experimentaba la reacción que tenía este elemento de crear electricidad al ser expuesto a luz solar [12]. Una década después, en el año 1883 se construye la primera célula fotovoltaica que utilizaba este elemento como semiconductor. Desde el año 1905 en adelante, se empieza a realizar investigaciones y publicaciones más exhaustivas referentes al efecto fotoeléctrico, llegando a su auge en el año 1921, año en el cual un artículo científico referente a este efecto recibe como reconocimiento un premio nobel [13]. Los continuos avances y logros sobre esta tecnología provocan que, en el año 1946, se patente la célula solar moderna; sin embargo, no es hasta el año 1954, en los laboratorios Bell, que se empieza a usar el silicio cristalino como elemento semiconductor, lo cual da lugar al nacimiento de la primera generación de paneles PV [14]. No obstante, en respuesta a las grandes cantidades de material, residuos y por tanto elevados costos de las células solares basadas en silicio, nace la segunda generación de paneles PV, denominados de película fina, cuya principal diferencia respecto de la anterior generación es el grosor de la lámina de la célula fotovoltaica [15]. Si bien estas son las 2 tecnologías que mantienen mayor presencia en el mercado actual de paneles fotovoltaicos, también es posible identificar una tercera y cuarta generación de celdas fotovoltaicas, caracterizadas en el uso de células solares orgánicas y células solares híbridas [15]; incluso es posible encontrar investigaciones sobre tecnologías emergentes o no convencionales que maximizan las bondades de diversos materiales de construcción para obtener la mejor eficiencia energética [16].

### **1.1.2.1. Presencia en el mercado**

Como se vio en el acápite anterior, en el mercado existe más de una tecnología de paneles fotovoltaicos, sin embargo, resulta interesante conocer cuál de estas tecnologías y/o generaciones de paneles tiene mayor presencia en el mercado actual; considerando este aspecto, aproximadamente el 90% de celdas solares que se usan en la actualidad corresponden a celdas de silicio cristalino, es decir a la primera generación de paneles PV [17]. Por otro lado, la demanda de paneles PV nace en Europa, específicamente en Alemania alrededor del año 2000, de hecho, para el año 2008 se estima que el mercado de paneles fotovoltaicos se concentró en

un 80% solo en Europa, lo cual se traduce en una mayor participación de productores chinos en el mercado de paneles PV en respuesta a la demanda y por ende una reducción significativa en los costos, en la última década los costos de los paneles solares han disminuido en un 67% [17].

### 1.1.2.2. Disponibilidad de paneles PV

En sintonía con el acápite anterior, definido el mercado de paneles PV, es importante conocer que tan económicamente factible es adquirir y hacer uso de este tipo de tecnología. Respecto de la disponibilidad económica de los paneles PV, los precios de estos varían principalmente en función del tamaño del sistema, locación geográfica, marca y calidad del panel, y tipo de panel (generación) [18], de estos factores el que afecta en mayor medida es el tamaño del sistema, en el cuadro adjunto se puede apreciar el costo promedio por Watt, en términos de potencia nominal, para aplicaciones residenciales:

Tamaño del sistema(kW)	Costo promedio(US\$/Watt)
4.00	2.66
5.00	3.50
6.00	3.37
8.00	3.18
10.00	3.05
12.00	2.93
20.00	2.79

Figura 2: Costo promedio (US\$/W) por tamaño del sistema (KW) [14]

De esta manera, se presenta la tendencia de la evolución del coste de paneles PV en términos de US\$/Watt, desde el año 2012 al 2023.

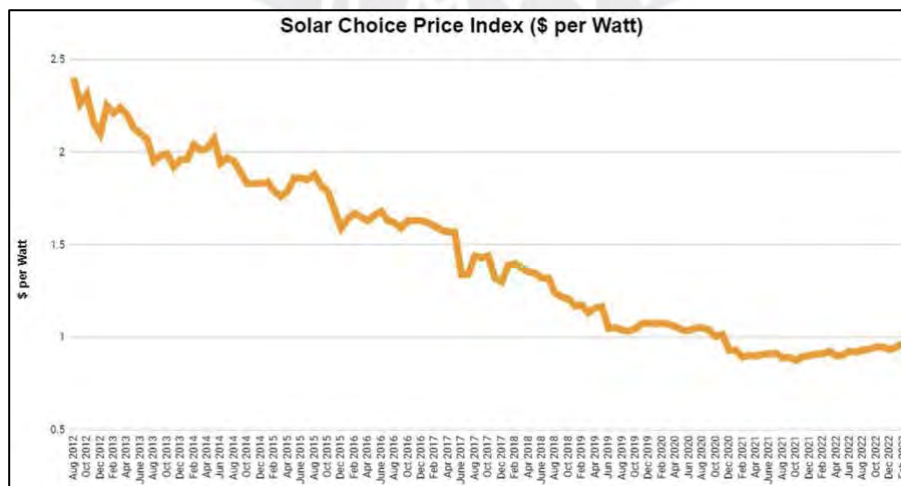


Figura 3: Tendencia de evolución de costos (US\$/Watt) [19]

En contraste, en el contexto nacional, y tomando como referente el catálogo de productos de paneles fotovoltaicos provisto por el distribuidor *AUTOSOLAR PERÚ S.A.C*, se obtiene la siguiente gráfica de costo de panel PV por capacidad de potencia.

Costo (S/.)	Costo promedio (\$)	Potencia (W)	Costo (USD\$/Watt)
1337.00	342.82	550	0.623
983.00	252.05	450	0.560
974.00	249.74	455	0.549
956.00	245.13	325	0.754
944.00	242.05	260	0.931
940.00	241.03	450	0.536
907.00	232.56	320	0.727
862.00	221.03	270	0.819
835.00	214.10	325	0.659
822.00	210.77	400	0.527
820.00	210.26	330	0.637
787.00	201.79	320	0.631

*Tabla 1: Costo de paneles solares en el mercado local [20]*

Acorde a las cantidades expuestas, se puede decir que los costos del mercado local siguen la tendencia evolutiva del mercado internacional, esto se debe a que el Perú no es un país productor de paneles PV sino consumidor; por lo tanto, los costos por unidad de potencia son similares tanto en el mercado local como internacional.

### **1.1.2.3. Beneficios y limitaciones**

En conjunto con los puntos anteriormente mencionados, señalar los beneficios y limitaciones asociados a las diversas aplicaciones de paneles PV resulta un punto clave para evidenciar la demanda presente sobre el mercado de los paneles PV.

En general, el primer beneficio perceptible es la usabilidad de una energía relativamente inagotable como fuente energética, como se vio en el acápite 1.1, esto es posible gracias al efecto fotoeléctrico. Por otro lado, como se presentó en la introducción del acápite 1.1.2, el crecimiento en la producción de paneles PV ha crecido a un ritmo considerablemente acelerado en las últimas décadas llegando a capacidades de producción de hasta 1400 GW[10], por lo que se trata de una tecnología con amplia demanda dentro del mercado de energías renovables. Finalmente, en la actualidad debido al principio de funcionamiento de estos dispositivos es posible llevar y suministrar de energía eléctrica lugares rurales de difícil acceso, donde el cableado eléctrico convencional no es factible para esta función; de hecho, existen iniciativas

y leyes nacionales que fomentan el desarrollo de proyectos con este objetivo [21]. Respecto de las limitaciones, bajo el mismo concepto de efecto fotoeléctrico, este no es completamente aprovechable si no se cuenta con una fuente de irradiancia que excite sus celdas, por lo que en determinadas zonas donde la irradiancia es baja, la eficiencia del panel fotovoltaico no es la misma que en una zona donde la irradiancia sea mayor. Asimismo, para producir una mayor cantidad de potencia, es necesario utilizar una mayor cantidad de celdas fotovoltaicas, esto se traduce en que el panel fotovoltaico debe ocupar una mayor área que la prevista inicialmente para determinada aplicación, ocasionando sobrecostos.

#### **1.1.2.4. Tipos de instalaciones fotovoltaicas**

Respecto a los tipos de instalaciones y aplicaciones de paneles fotovoltaicos, si bien existen muchos criterios para clasificar y agrupar los paneles solares, como la eficiencia, el tamaño, la tecnología y el tipo de material utilizado, se describirán los tipos en función de la forma en cómo se integran, implementan y utilizan en un sistema eléctrico. Esta clasificación es relevante porque el objetivo principal de los paneles solares es producir y suministrar energía eléctrica, y la forma en que se integran en un sistema eléctrico afecta su rendimiento y su capacidad para lograrlo; de hecho, a menudo la forma de integrar un panel a un sistema eléctrico suele restringir las características de este. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta esta clasificación al elegir y utilizar los paneles solares. Según este criterio se pueden identificar 3 grandes grupos de sistemas fotovoltaicos:

- Sistemas fotovoltaicos *On-Grid* .- También denominados sistemas conectados a la red, son aquellos que están conectados a la toma central de la red eléctrica, estos permiten el consumo de energía eléctrica generada por los paneles solares y retorno a la toma central de la red en caso hubiera excedentes; estos sistemas suelen estar compuestos por paneles solares, inversores trifásicos entre otros componentes [22].



Figura 4: Sistemas Fotovoltaicos On-Grid[23]

- Sistemas fotovoltaicos *Off-Grid* .- También denominados sistemas independientes, son aquellos no están conectados a la red eléctrica y requieren almacenar la energía eléctrica generada para su uso posterior; por este motivo se suelen acompañar con baterías, sistemas de carga y un grupo electrógeno [22].



Figura 5: Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid[23]

- Sistemas fotovoltaicos Híbridos .- Como su nombre lo indica son sistemas que reúnen características de los anteriores mencionados, permitiendo tanto la conexión a la red eléctrica como el almacenamiento de energía en baterías. Este tipo de sistema es útil para aplicaciones donde se requiera acceder a la red eléctrica o usar la energía almacenada en baterías según sea necesario [24][22].

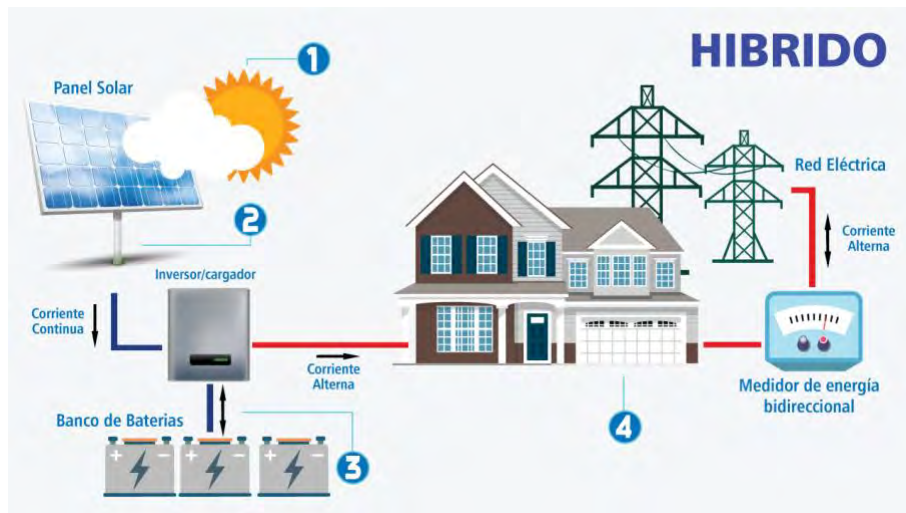


Figura 6: Sistemas Fotovoltaicos Híbridos[23]

## 1.2. Marco Problemático

El acápite anterior tuvo por objetivo presentar el contexto histórico de los paneles fotovoltaicos, desarrollando los aspectos de la presencia en el mercado de esta tecnología, así como la disponibilidad nacional e internacional de estos; sin embargo, como toda tecnología, esta se concibe a partir de una necesidad, demanda o problemática inicial que se debe satisfacer. Por otro lado, es de suma importancia analizar la factibilidad de las tecnologías como propuesta de solución, observando de primera mano los inconvenientes que puede acarrear el uso de estas. Es así como, el presente capítulo desarrolla estas dos dimensiones que se encuentran involucradas en el uso de paneles fotovoltaicos.

### 1.2.1. Problemática ambiental

A lo largo de la historia de la humanidad, se ha pasado por diversas revoluciones industrial-tecnológicas, por lo general estas suponen una serie de cambios en tecnología, paradigmas y demás aspectos en diferentes tipos de industrias; en la actualidad vivimos en una época que goza de grandes avances tecnológicos; de hecho, al día de hoy se considera culminada la tercera revolución industrial, definida principalmente por la miniaturización electrónica [25] que permite, entre otras aplicaciones, el uso de tecnologías como computadoras, *smartphones* y *notebooks*, esta revolución también se caracteriza por la velocidad del cambio y la globalización tecnológica [25].

Por otro lado, la población mundial va incrementándose de manera paulatina, por tanto, la demanda de recursos a utilizar también aumenta, así como el consumo de estos; en términos de energía, investigaciones científicas señalan que la cantidad de energía necesaria para suplir la demanda mundial llegaría a los 778 Exajulios (EJ) para el año 2035 [26]; sin embargo, otros

estudios más recientes evidencian demandas de más de 550 exajulios (EJ) al término del año 2020 [27], lo que presupone un mayor aumento en términos de consumo energético al previsto anteriormente. Si bien estos factores pueden interpretarse de primera mano cómo resultado del desarrollo histórico y natural de la especie humana; lo cierto es que, en conjunto, acarrearán un impacto medioambiental que se suele ignorar, y que en un mediano/largo plazo puede resultar pernicioso para la humanidad. De hecho, se estima que en las últimas 4 décadas las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado en un ratio de alrededor de 1% por año [28]. En el ámbito de la Ingeniería electrónica, existen alternativas de solución ante problemáticas ambientales, por ejemplo, es posible mencionar 2:

- Control y Automatización .- Una solución que aborda la problemática energética-ambiental es el uso de sistemas inteligentes en edificios de alto consumo eléctrico. Estos sistemas utilizan sensores, controladores y software para optimizar el consumo de energía en edificios, por ejemplo, regulando la temperatura y la iluminación de manera automática; implementando sistemas de iluminación dependiendo de la presencia de personal. De esta manera, a la vez que se mejora la experiencia de usuario y se reducen costos, es posible reducir el consumo de energía y, en consecuencia, la emisión de gases contaminantes [29].
- Electricidad y energía .- Una solución que aborda la problemática ambiental asociada a la emisión de gases contaminantes en función del uso de vehículos de combustible fósiles, es el uso de baterías eléctricas recargables en vehículos eléctricos como energía limpia. Además, el uso de vehículos eléctricos logra hacer consumos energéticos más eficientes. Finalmente, estos vehículos pueden ser recargados utilizando energía renovable generada por paneles solares o turbinas eólicas, lo que contribuye a un sistema de transporte más sostenible [30].

Evidenciando el impacto ambiental de estos días, diversas organizaciones, entidades nacionales y entidades internacionales a nivel mundial han sumado esfuerzos para combatir esta situación, mediante iniciativas que buscan regular esta problemática ambiental; un claro ejemplo es lo realizado en las COP, conferencias anuales donde los líderes mundiales se reúnen para discutir y acordar medidas con motivo de reducir las emisiones de GEI y cumplir lo pactado en el Tratado de París [31]. Sin embargo, la realidad es que los esfuerzos que se puedan estar realizando no son suficientes para alcanzar este objetivo; prueba de ello fue la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) en el año 2021, también denominada "*The Last Chance Saloon*", metáfora que hace referencia a que la COP26 es la última

oportunidad para tomar medidas significativas y evitar los peores efectos del cambio climático, considerando que de no actuar ahora podríamos llegar a un punto de no retorno. La última versión de esta conferencia fue la COP29 en el año 2024, donde el acuerdo con mayor relevancia fue el financiamiento económico por parte de países desarrollados en favor de los países en vía de desarrollo para la ejecución de iniciativas en contra del cambio climático, sin embargo, este tipo de beneficios no promueven ni colaboran directamente con la ejecución de estas iniciativas. Entre solo algunas de las consecuencias más graves se tienen las siguientes: aumento de la temperatura global, cambios climáticos extremos, pérdida de biodiversidad, escasez de agua, pérdida de hielo y aumento del nivel del mar, impactos económicos y sociales. Ante tan emergente situación, en diferentes países se han instaurado herramientas que permitan abordar esta problemática, estas se presentan en forma de iniciativas, normativas o tratados; en las siguientes líneas se describirán las más relevantes.

### **1.2.1.1. Iniciativas, normativas y tratados internacionales**

En respuesta a la problemática ambiental que se ha presentado en los últimos años, surgen medidas que regulan el impacto medioambiental, algunas de las más relevantes y que se encuentran vigentes en la actualidad a nivel internacional son las siguientes:

#### **Tratado de París:**

El tratado de París es un acuerdo firmado en el año 2015 entre los países asociados a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que exhorta a las naciones desarrolladas y en proceso de desarrollo, y sus respectivas industrias, a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sus economías correspondientes; el objetivo específico del tratado de París es evitar que la temperatura media global del planeta supere los 2 °C respecto a los niveles previos a la industrialización; asimismo, busca promover mayores esfuerzos por parte de los países participantes para que este calentamiento global no supere los 1.5 °C en los años futuros; finalmente, los plazos para la ejecución de estas medidas corresponden a ciclos de cada 5 años, buscando cada vez objetivos más ambiciosos [31].

#### **Estándar ISO 14001:**

Propuesto por la Organización Internacional de Estandarización (ISO), es un estándar que avala o certifica que una determinada empresa cuente con un sistema de gestión ambiental; el objetivo de estos sistemas es el identificar, administrar, monitorear y controlar el impacto ambiental asociado a los diversos procesos existentes en una determinada empresa; en ese

sentido, fomenta un uso más eficiente de recursos y una reducción de residuos para cada proceso existente [32].

Asimismo, por el lado de obtención de energías limpias y renovables se tiene lo siguiente:

### **Objetivos de Desarrollo Sostenible (7 y 13):**

Los 17 objetivos de desarrollo sostenible fueron propuestos en el año 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) y tienen como objetivo en conjunto garantizar una óptima calidad de vida en el corto-mediano plazo (2030). En particular, el objetivo 7 hace referencia a la implementación y uso de fuentes de energía asequibles y no contaminantes, y tiene como meta aumentar la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas [33]. Por su lado, el objetivo 13 busca fomentar la toma de medidas que afronten las emisiones de GEI que se emiten a la atmósfera, entre sus metas se encuentra la incorporación de medidas relativas al cambio climático en políticas, estrategias y planes nacionales [34].

### **Sistema de Certificación de Energía Renovable Internacional:**

El Sistema de Certificación de Energía Renovable Internacional (I-RECs) es un mecanismo de certificación de la energía renovable generada en todo el mundo; establece una forma de medir y validar la generación de energías renovables (como la energía eólica o la fotovoltaica, por ejemplo); el sistema consiste en la emisión de certificados para cada MWh de energía renovable generada, cada certificado representa la garantía de que un MWh de energía renovable ha sido generado de manera legítima en un lugar y momento específico [35]. De esta forma, compradores de energía renovable pueden validar que los productores generan esta energía de forma limpia y según el estándar de certificación I-RECs.

#### **1.2.1.2. Iniciativas, normativas y tratados nacionales**

Conocidas las diferentes propuestas que se encuentran vigentes en el ámbito internacional, es importante poder contrastar las mismas respecto de las propuestas que se pueden encontrar el escenario nacional, destacando principalmente medidas relacionadas al uso de energías renovables, incluida la fotovoltaica.

### **Ley de Promoción y Utilización de los Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en Zonas Rurales, Aisladas y de Frontera del País (N.º 28546):**

Esta ley tiene por objetivo promover el uso de fuentes energéticas no convencionales para electrificación en zonas rurales o de difícil acceso. Las energías renovables no convencionales comprenden las fuentes permanentes que forman parte de los recursos naturales renovables, exceptuando la energía hidráulica a grandes potencias. Entre este tipo de energías se tiene energía solar, eólica, mareomotriz, biomasa, geotérmica, entre otras [21].

### **Decreto legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables (N.º 1002):**

Este decreto tiene por objetivo incentivar la inversión nacional y extranjera en la producción de electricidad basada en el aprovechamiento de recursos energético-renovables (RER); asimismo, la entidad encargada de promover este tipo de proyectos es el Ministerio de Energía y Minas (MINAM). Las metas principales de este decreto son poder diversificar el repertorio de energías renovables en el Perú y poder masificar su uso a través de proyectos de energización [36].

En ese sentido, también es posible identificar también dispositivos reguladores en función del uso de la energía fotovoltaica, como:

### **Norma DGE, especificación técnica del sistema fotovoltaico y sus componentes para electrificación rural:**

Esta norma establece y define los requisitos técnicos y de calidad para los sistemas fotovoltaicos y los componentes internos que lo constituyen, en el marco de la electrificación rural en el Perú; la norma específica los requisitos para los componentes del sistema fotovoltaico, como paneles solares, inversores, baterías, entre otros; asimismo, establece las exigencias para su instalación y mantenimiento. Finalmente, el objetivo de la norma es garantizar que los sistemas fotovoltaicos cumplan con determinados estándares de calidad [37].

### **Reglamento de Generación Distribuida:**

Si bien el concepto de generación distribuida puede variar entre país y país, la característica principal y común es que consiste en la generación eléctrica lo más cerca a la red de distribución, entre algunos de los beneficios se tienen del tipo económico, técnico, ambiental y social [38]. En el Perú, la generación distribuida se constituye en la Ley para asegurar el

desarrollo eficiente de la Generación Eléctrica (N° 28832) y en el Decreto legislativo que mejora la regulación de la distribución de electricidad para promover el acceso a la energía eléctrica en el Perú (N° 1221); no obstante, si bien el concepto de generación distribuida se presenta en estos 2 dispositivos, lo cierto es que hasta este momento no se ha aprobado el reglamento de generación distribuida a nivel nacional.

## **1.2.2. Reciclaje**

Dentro de las alternativas que afrontan la problemática ambiental expuesta en el acápite anterior, el reciclaje representa una de las alternativas más extendidas y conocidas a nivel mundial. Se denomina reciclaje a la técnica de reaprovechamiento de residuos sólidos y su transformación en materia prima, permitiendo así la minimización en la generación de residuos [5]. La finalidad de los siguientes acápites es presentar una vista general sobre los procesos de reciclaje en la actualidad, cuál es la presencia de esta alternativa de solución en productos electrónicos y cómo se introduce este concepto al final del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos, específicamente en la cadena o ciclo fotovoltaico [7].

### **1.2.2.1. Procesos de reciclaje**

En la actualidad, si bien es cierto que no es posible rehusar el 100% de los materiales que se reciclan, en general el concepto de reciclaje se extiende a una gran variedad de industrias. Por ejemplo, una de las materias primas de mayor presencia en las industrias es el papel; con respecto al reciclaje de esta materia, el procedimiento estándar consiste en una serie secuencial de pasos para tratar el papel, donde este pasa por una etapa de pulpeado, destintado, filtrado, mezclado, prensado y secado, finalmente se obtiene papel reciclado ecológico [39]. Otra de las materias primas que se usa ampliamente en la industria es el plástico; a diferencia del papel, el plástico tiende a demorar muchos años más en degradarse por lo que en este caso el rol del reciclaje es incluso más importante; en este caso los procesos de reciclaje se dividen en 2: reciclaje químico y mecánico, el primero hace referencia a degradar el plástico a nivel molecular mediante procedimientos químicos, mientras que el segundo consiste en la recolección, troceado, limpieza y enfardado de este material [40].

### **1.2.2.2. Procesos de reciclaje de productos electrónicos**

Si bien algunos procesos de reciclaje se encuentran ampliamente extendidos a lo largo de las diferentes industrias a nivel mundial, una categoría aparte responde al reciclaje de productos electrónicos, puesto que no se trata de materia prima que se pueda tratar de primera mano, sino que requiere de un proceso más exhaustivo que permita recuperar el material utilizado para

reducir los residuos al final de la vida útil de los mismos. Asimismo, el consumo de estos aparatos eléctricos y electrónicos asciende a las 2.5 toneladas métricas anuales, lo que brinda incluso mayor relevancia a los procesos de reciclaje de productos electrónicos [41]. Por ejemplo, en un escenario internacional, en España las categorías de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) por unidad se divide de la siguiente manera:

Categoría	Total (Mill. Uds)	Doméstico (Mill. Uds)	Profesional (Mill. Uds)
1 Aparatos de intercambio de temperatura	5,01	4,55	0,46
2 Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas	10,16	9,61	0,55
3 Lámparas	68,78	68,78	0,00
4 Grandes aparatos	54,40	20,03	34,37
5 Pequeños aparatos	398,49	259,65	138,84
6 Equipos de informática y telecomunicaciones pequeños	193,22	193,22	0,00
7 Paneles fotovoltaicos grandes	3,97	0,00	3,97
<b>Total AEE</b>	<b>734,03</b>	<b>555,84</b>	<b>178,19</b>

Figura 7: Unidades de AEE puestos en el mercado en España en 2019[41]

Asimismo, al ser partícipe de la Unión Europea, también se aplica la denominada legislación europea sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) o **Directiva 2012/19/UE** Cuyo objetivo consiste en regular y reducir el impacto negativo provocado por la generación de los RAEE, exhortando a productores y responsables de reciclado a colaborar de manera conjunta para la obtención diseño ecológico que facilite la utilización y el tratamiento de los RAEE [41].

En contraste, en el contexto nacional se cuenta con el reglamento nacional para la gestión y manejo de los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos elaborado por el Ministerio del Ambiente (MINAM). El objetivo principal de este reglamento es poder estandarizar y establecer un conjunto de derechos y obligaciones para la correcta gestión de los RAEE a través de las diferentes etapas de manejo: generación, recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento, reaprovechamiento y disposición final; involucrando además a los actores encargados en cada etapa [42].

### 1.2.2.3. Procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos

Mencionados los diversos procesos de reciclaje en la actualidad, es posible señalar el contexto respecto de los procesos de reciclaje actuales en la industria de paneles fotovoltaicos. Principalmente, es posible mencionar las siguientes regulaciones a nivel internacional[43]:

- Regulaciones en Europa y Reino Unido: En este caso se cuenta con la WEEE (Waste Electrical and Electronic Waste Directives), un conjunto de directivas cuyo objetivo es gestionar la recolección, el tratamiento y la eliminación de productos, colocando

además restricciones en el diseño de paneles fotovoltaicos que faciliten los tratamientos al final de su vida útil [43].

- Regulaciones en Estados Unidos: Para el caso de Estados Unidos, no existe propiamente una regulación focalizada en reciclaje de paneles fotovoltaicos, sino que esta gestión es tratada acorde a la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos; asimismo, empresas productoras de paneles fotovoltaicos como *First Solar* y *Solar World* apoyan la recuperación total de los paneles que producen [43].
- Regulaciones en China: Como país con la mayor producción de paneles fotovoltaicos, China no cuenta con una regulación para la gestión y tratamiento de paneles solares al final de su vida útil; dado que, si bien China posee su propia política de residuos electrónicos y eléctricos, los paneles fotovoltaicos no son considerados como residuos electrónicos y como resultado no existe una regulación en los procesos de reciclaje de estos [43].
- Regulaciones en Perú: En el contexto nacional, como se mencionó en el acápite anterior, para la disposición de los residuos de dispositivos eléctricos se cuenta con el reglamento nacional para la gestión y manejo de los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos, dentro del mismo no es posible identificar una categoría o acápite que referencie la disposición de paneles fotovoltaicos [42].

### **1.3. Relevancia de la investigación**

Como se pudo observar en el desarrollo de los acápites anteriormente presentados, en la actualidad existe una problemática, una necesidad, una demanda y un mercado que propone el uso de paneles fotovoltaicos como alternativa de solución, sin embargo, por este mismo hecho resulta de suma importancia poder justificar y valorar debidamente el uso de este tipo de tecnología como alternativa para solucionar la problemática ambiental detrás. Por otro lado, debido a que los procesos de reciclaje se encuentran de momento en una etapa emergente, es necesario realizar un análisis sobre el impacto medioambiental de los mismos, puesto que estos guardan relación directa con el impacto asociado a los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo principal**

Evaluar la eficiencia de los procesos de reciclaje actuales a través de un análisis cualitativo-cuantitativo y dimensionar su impacto ambiental en términos de huella de carbono (tCO<sub>2</sub>).

### **1.4.2. Objetivos específicos**

Con el objetivo de poder valorar la eficiencia de los procesos de reciclaje, es necesario abordar 3 puntos clave. El primero consiste en analizar los procesos de reciclaje a nivel cualitativo, es decir, desarrollar y describir cuales son estos procesos, qué objetos y/o agentes se encuentran involucrados y finalmente cómo se desarrollan. El segundo punto consiste en poder cuantificar cada uno de estos procesos descritos cualitativamente, es decir, asociar un número específico a nivel de consumo energético y a nivel de huella de carbono. El último punto consiste en poder extrapolar y redimensionar lo analizado con anterioridad a un caso general, es decir, poder calcular y justificar *a priori* el uso de una determinada aplicación de paneles fotovoltaicos, a través del impacto medioambiental asociado a esta. Finalmente, los siguientes objetivos específicos resumen y responden lo mencionado anteriormente:

- Analizar cualitativamente los procesos de reciclaje vigentes de paneles fotovoltaicos.
- Efectuar un balance energético sobre los procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos que permita valorar la eficiencia de estos.
- Realizar un dimensionamiento del impacto medioambiental del proceso de reciclaje completo de paneles fotovoltaicos en base el nivel de huella de carbono asociado a los subprocesos que lo componen.

## 2. CAPITULO 2: PLANTEAMIENTO TEÓRICO PARA EL ANÁLISIS CUALITATIVO-CUANTITATIVO DE LOS PROCESOS DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS

### 2.1. Paneles fotovoltaicos

Con el objetivo de poder describir los procesos de reciclaje, y posteriormente, elaborar el análisis cualitativo y cuantitativo de los mismos, es importante tener en consideración los dispositivos, materiales y elementos en general, que se encuentran presentes en los paneles PV; es por ello que el presente acápite presenta la estructura general del panel fotovoltaico a nivel de estructura y composición.

#### 2.1.1. Estructura de paneles fotovoltaicos

Presentar la estructura funcional del panel fotovoltaico permite desglosar y segregar el panel PV en función a los materiales y/o elementos presentes en el mismo; conocer la presencia de los materiales involucrados será importante para proceder con el análisis cualitativo y cuantitativo del impacto ambiental de los procesos de reciclaje de los mismos. En términos generales, la estructura de un panel fotovoltaico contempla un soporte, cables de conexión, marco de panel, encapsulado y conexionado [44]. Además, en adición al propio cableado interno del panel, si se desglosa aún más el encapsulado, la estructura vertical del panel fotovoltaico queda de la siguiente manera:

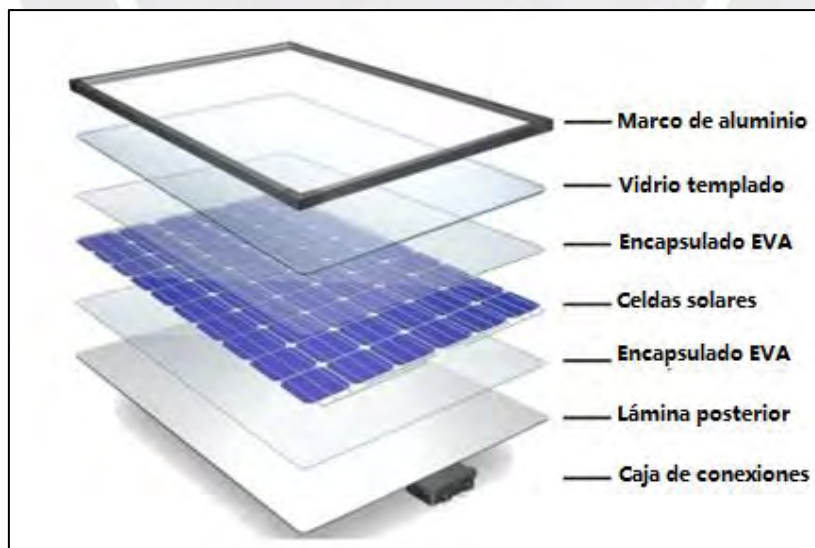


Figura 8: Estructura de panel fotovoltaico[44]

De manera puntual la distribución es la siguiente:

- Marco de panel: El marco del panel fotovoltaico juega un rol de suma importancia dado que debe proveer una sólida estructura que permita proteger el propio panel y las celdas fotovoltaicas internas en el mismo [45].
- Vidrio templado: Se trata de una lámina de vidrio que se coloca en la superficie de las celdas solares y sirve como dispositivo de protección, en este caso, ante cambios climáticos y precipitaciones como lluvia, granizo, entre otros. El grosor estándar de esta lámina es de 3-4mm [45].
- Encapsulado EVA: El encapsulado Etileno acetato de vinilo, es un polímero que tiene 2 objetivos, el primero es el de mantener la celda fotovoltaica en una posición fija durante la manufactura del panel PV, el segundo es el de prevenir a largo plazo la entrada de humedad y suciedad; este encapsulado contiene internamente las celdas fotovoltaicas [45].
- Lámina posterior: Forma parte del soporte del panel PV, actúa como barrera contra la humedad y proporciona protección mecánica y aislamiento eléctrico. La lámina posterior está hecha de varios polímeros o plásticos, como PP (Polipropileno), PET (Tereftalato de polietileno) y PVF (Fluoruro de polivinilo), estos ofrecen niveles de protección, estabilidad térmica y resistencia a los rayos UV a largo plazo; por lo general también se suele considerar una lámina posterior final [45].
- Caja de conexiones: Se ubica en la parte posterior inferior del panel, cumple la función de cubrir y proteger las interconexiones que haya entre paneles fotovoltaicos; asimismo, dentro de la caja de conexiones se ubican diodos de protección que protegen al panel solar de flujos en sentido contrario de corriente. [45].

### **2.1.2. Presencia de materiales en paneles PV**

Como se presentó en el acápite anterior, cada elemento del panel PV está constituido por determinados materiales y/o sustancias en mayor o menor medida; en general, la presencia de sustancias en los paneles PV de primera generación (Silicio policristalino), en términos de porcentaje respecto de la composición total de los paneles PV, es el siguiente: 75% de vidrio, 10% de polímero, 8% de aluminio, 5% de silicio, 1% de cobre, 1% de plata y materiales en menor participación como el plomo y estaño [46]. Análogamente, respecto de los paneles fotovoltaicos de segunda generación (*Thin Film*), la distribución de materiales es la siguiente: 88% vidrio, 7% aluminio, 4% polímeros, 1% metal semiconductor distribuido en 10% cobre, 28% indio, 10% galio y 52% selenio. Es importante considerar ambas generaciones de paneles PV, puesto que como se vio en el capítulo anterior, son las generaciones con mayor presencia

en la actualidad [46]. De manera visual, la presencia de los materiales en el panel PV de primera generación se muestra a continuación:

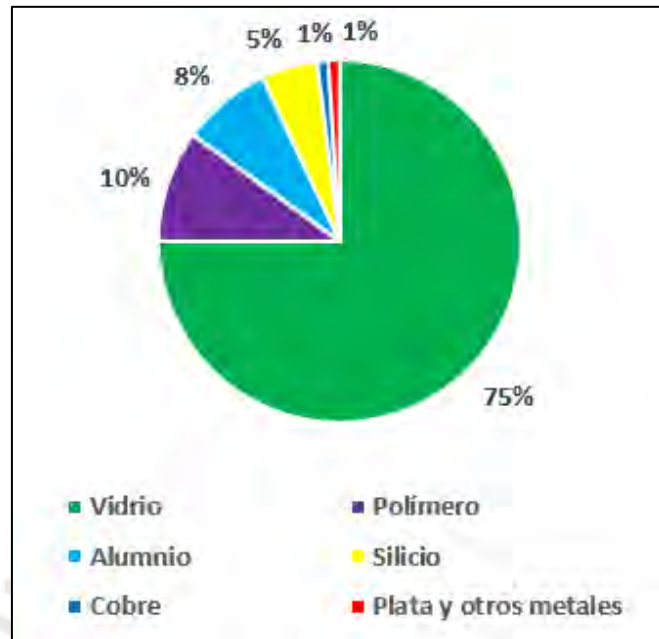


Figura 9: Materiales en el panel PV (1era gen.)

Asimismo, se presenta el gráfico correspondiente a la presencia de materiales para un panel PV de segunda generación:

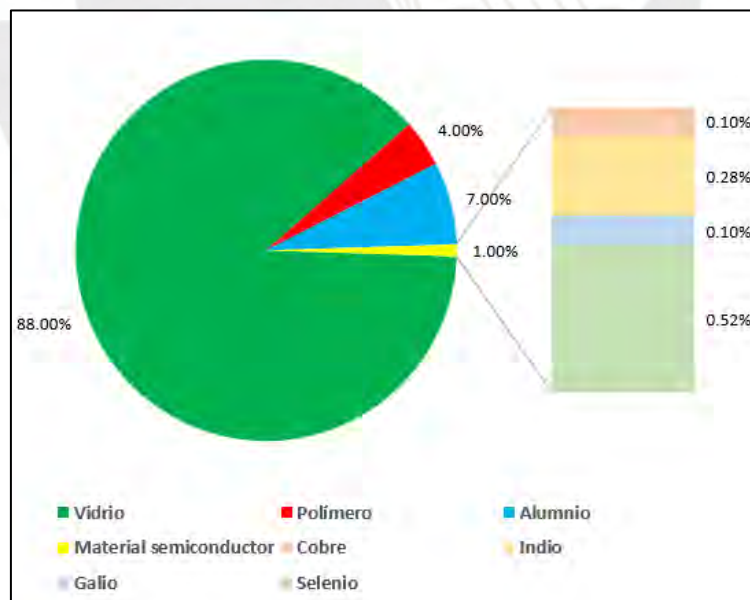


Figura 10: Materiales en el panel PV (2da gen.)

### **2.1.3. Silicio en paneles fotovoltaicos**

Como se describió anteriormente, además del vidrio, uno de los elementos con mayor presencia en los paneles PV de primera generación es el silicio, debido a las aplicaciones del mismo como semiconductor; no obstante, como se vio en el capítulo anterior, a lo largo de la historia del panel PV no ha sido el único elemento con el cual se ha experimentado; en ese sentido, el objetivo del presente acápite es describir los motivos que justifican, a día de hoy, su uso en la elaboración de paneles PV.

En primer lugar, el silicio es el semiconductor más abundante en la superficie terrestre [47]; en general, su uso se encuentra tan extendido para la elaboración de paneles fotovoltaicos, principalmente, debido a los siguientes motivos:

- El silicio como semiconductor es un metaloide, esto quiere decir que contiene propiedades tanto de metales como de no metales [47].
- Posee una amplia disponibilidad, no solo es el semiconductor más abundante en la superficie terrestre, sino que como elemento es el segundo más abundante en la corteza terrestre, solo superado por el oxígeno [47].
- En contraste a los demás metaloides de la tabla periódica, el silicio es capaz de soportar altas temperaturas con un punto de fusión de 1410 °C, lo que lo hace idóneo para aplicaciones con un rango de trabajo inferiores a los 100 °C, como los paneles fotovoltaicos [47].
- Dependiendo del tipo de silicio a usar para la celda se puede obtener un mejor o menor rendimiento en función de la aplicación que se requiere implementar, por ejemplo, paneles con silicio monocristalino tienden a ser menos eficientes que los de película fina, pero a su vez más eficientes que los de silicio amorfo [47] [48].

Hacer especial énfasis en el uso del silicio es conveniente puesto que en los acápites siguientes se presentarán conceptos asociados a su funcionamiento como semiconductor y posteriormente a los procesos de reciclaje cuyo objetivo es reutilizar este elemento.

### **2.1.4. Principio de funcionamiento**

Para desarrollar el principio de funcionamiento del panel PV, es necesario abarcar a detalle el concepto de efecto fotoeléctrico definido en el capítulo anterior. Ante la incidencia de un fotón sobre el cátodo de un material fotosensible, este emite un electrón cargado de energía cinética la cual depende de la frecuencia del fotón y del material del cátodo [49]. En otras palabras, el efecto fotoeléctrico consiste en que, ante una emisión de fotones energizados desde una fuente

radiante sobre algún material semiconductor, se generará un movimiento o desprendimiento de los electrones de este material, transmitiéndose así, energía cinética.

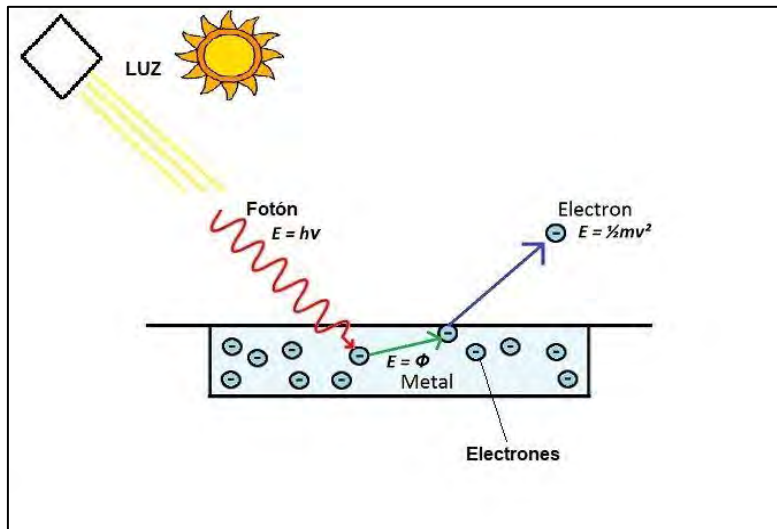


Figura 11: Ilustración efecto fotoeléctrico[50]

No obstante, el principio de funcionamiento de la celda solar se basa en el efecto fotovoltaico, una aplicación del efecto fotoeléctrico. Hasta el momento se explicó el efecto fotoeléctrico como un desplazamiento de electrones ante incidencia lumínica, el efecto fotovoltaico aprovecha este movimiento de electrones y mediante la unión PN entre dos semiconductores dopados “n” y “p” respectivamente, permite producir corriente eléctrica del tipo DC [51]. Posteriormente, en función al tipo de semiconductor que se use, la celda fotovoltaica como unidad fundamental del panel produce un voltaje cuyo valor oscila los 0.5 y 0.8 Voltios [51].

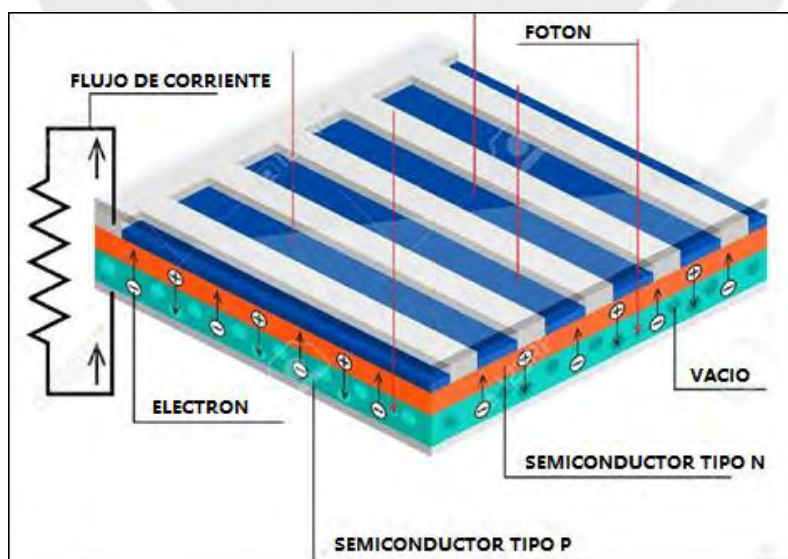


Figura 12: Efecto Fotovoltaico[52]

### 2.1.5. Circuito equivalente y potencia asociada

Conocido el principio de funcionamiento de la celda fotovoltaica, resulta conveniente revisar el modelo del circuito equivalente a nivel funcional de la celda fotovoltaica, esto será de utilidad para poder tratar posteriormente los conceptos de potencia y eficiencia de una celda y un panel PV.

El circuito eléctrico equivalente a la celda fotovoltaica puede representarse por una fuente de corriente la cual depende de la irradiancia que incide sobre la celda, un diodo ideal caracterizado por su factor de linealidad 'n', una corriente de saturación  $I_0$  que atraviesa este diodo, una resistencia en serie  $R_s$  y una resistencia de cortocircuito o shunt  $R_{sh}$ , ambas corresponden a resistencias de pérdida.

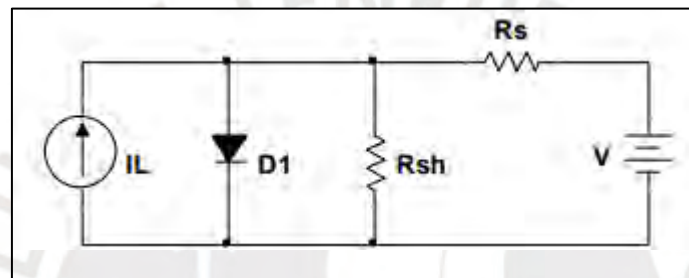


Figura 13: Representación eléctrica de una celda PV [51]

La representación del modelo matemático que describe la curva V-I de este circuito viene definido por la ecuación 2.1:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.1)$$

Con:

$$a = k \cdot T_c \cdot A$$

Donde:

- $I_L$ : Corriente foto generada
- $I_0$ : Corriente de saturación inversa
- $R_s$ : Resistencia en serie
- $R_{sh}$ : Resistencia en paralelo
- $q$ : Carga de un electrón ( $1.6 \times 10^{-19}C$ )
- $k$ : Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} J/K$ )
- $T_c$ : Temperatura de la celda
- $A$ : Factor de idealidad Silicio/Germanio

Además de ello, respecto de la corriente foto generada, el modelo matemático que define el comportamiento de la misma viene definido por la ecuación 2.2:

$$I_L = \frac{S}{S_{REF}} [I_{L,REF} + \mu_{ISC} (T_C - T_{C,REF})] \quad (2.2)$$

Donde:

$I_L$ : Corriente foto generada

$S$ : Irradiancia solar

$S_{REF}$ : Irradiancia solar nominal (1000 W/m<sup>2</sup>)

$I_{L,REF}$ : Corriente fotogenerada nominal ( $I_{L,REF} = I_{SC}$ )

$\mu_{ISC}$ : Coeficiente de cortocircuito (Dado por el fabricante)

$T_C$ : Temperatura de la celda

$T_{C,REF}$ : Temperatura de la celda en condiciones nominales (25 °C)

Del modelo matemático, se evidencia que la irradiancia es un parámetro del cual depende la corriente fotogenerada. A continuación, se presentan las gráficas de corriente vs tensión, según los modelados matemáticos presentados, bajo diferentes niveles de irradiancia:

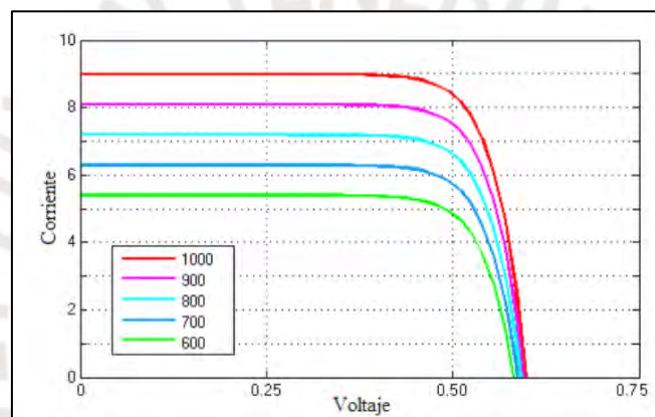


Figura 14: Gráficas V vs I en función de la Irradiancia [51]

Finalmente, se observa que conforme la irradiancia aumenta, también lo hace la corriente, permaneciendo el voltaje constante, lo cual supone a priori un aumento en la potencia de igual manera.

### 2.1.6. Mapas de Irradiancia

La irradiancia está ligada a características meteorológicas, geográficas y latitud de determinada zona, en ese sentido, los mapas de irradiancia son una herramienta útil para determinar y predecir el nivel de irradiancia que incidirá para una determinada aplicación de paneles solares, esto permite un dimensionamiento más preciso para estas aplicaciones, en función al nivel de irradiancia de determinada zona. Los mapas de Irradiancia recopilan datos de este parámetro a lo largo del litoral de un determinado país para su uso. En este caso se muestra el mapa de irradiancia más actual para la geografía peruana elaborado por World Bank Group en el año 2019, este contempla los promedios de irradiación directa normal en el período de 1999-2018.



Figura 15: Mapa de Irradiancia del Perú año 2019 [53]

Como se puede observar, los departamentos con un mayor índice de irradiancia en el Perú se encuentran en el sur del País; es decir, debido a su geografía, los departamentos en el sur del Perú serán los que puedan generar una mayor potencia debido a sus niveles de irradiancia respecto del resto de departamentos.

### 2.1.7. Eficiencia de paneles fotovoltaica

Explicado el modelo matemático de la celda fotovoltaica, se puede pasar a explicar la eficiencia del panel fotovoltaico. Como se sabe, la estructura del panel fotovoltaico se construye a partir de un determinado número y distribución de celdas fotovoltaicas, por lo general, los paneles están constituidos entre 36 a 96 celdas PV, el número de celdas que contiene un panel PV es directamente proporcional a la potencia de este, llegando desde los 100 W hasta los casi 450 W [54]. El concepto de potencia de un panel PV se interpreta como la relación porcentual entre

la potencia máxima que brinda el panel, respecto a la potencia máxima nominal, es decir, cuando opera bajo la irradiancia nominal de  $1000 \text{ W/m}^2$  en la misma área [55].

### **2.1.7.1. Garantía limitada de potencia/producto**

Así como cualquier otro dispositivo electrónico, los fabricantes de paneles PV ofrecen garantías respecto del uso de paneles PV; dado que los paneles PV tienen por finalidad la generación de energía eléctrica, la garantía limitada de potencia gira entorno a la garantía referente a la cantidad de potencia efectiva que deberán ser capaces de entregar los paneles PV a lo largo de su vida útil. Por ejemplo, para el caso de los paneles PV del fabricante CSI solar, la garantía limitada de potencia indica lo siguiente: *“Durante el primer año, CSI Solar garantiza que la potencia de salida real de los productos no será inferior al 98% de la potencia de salida etiquetada en dicho producto”*. Asimismo, también se indica: *“Desde el año 2 hasta el año 25, la degradación anual no será superior al 0,55 %; al final del año 25, la potencia de salida real no será inferior al 84,8 % de la potencia de salida etiquetada.”* [56]. Por otro lado, la garantía limitada de potencia para los paneles del fabricante SUNPOWER indica lo siguiente: *“La potencia de los Módulos FV será como mínimo de un 97,5% de la Potencia Pico Mínima durante el primer año, y que durante los 24 años siguientes la degradación anual no será superior a un 0,5%, de manera que la potencia de los Módulos FV al final del año 25° del Periodo de Garantía será como mínimo de un 85,5%”* [57]. Como se puede apreciar, ambas garantías, y en general, ofrecen características de degradación similares.

Si bien estas garantías, son brindadas por los propios fabricantes de los paneles PV, en la realidad las ratios de degradación reales por lo general difieren de estas, esto es especialmente importante puesto que se presupone que los paneles PV poseen una larga vida útil asociada a la garantía en sí; si esta no se cumple, la vida útil del panel se acorta así como la sostenibilidad del mismo, en términos de huella de carbono, aumenta. Por ejemplo, en [58] se analizó el porcentaje de degradación de 16 módulos PV (6 tipo HIT o 3era generación, 5 policristalinos y 5 de silicio amorfo) al año 12 de su uso continuo; el análisis de degradación consistió en analizar las curvas V-I de los módulos PV y contrastar los resultados con la garantía limitada de potencia ofrecida por el fabricante; para los paneles con menor ratio de degradación, los de tipo HIT, el porcentaje de degradación en promedio fue de 1.17% al año 12 de su uso, es decir, dentro del 20% de degradación al año 25 que ofrece el fabricante; por otro lado, respecto de los paneles policristalinos, al año 12 mostraron un ratio de degradación anual promedio de 1.61% por año, es decir, fuera del 1% por año de degradación al año 25 que ofrece el fabricante; finalmente, respecto de los paneles de silicio amorfo, uno de estos presentó un *“Hotspot”*,

término utilizado para describir un sobrecalentamiento anormal en una celda solar, en un área de celdas solares, mientras que los 2 restantes al año 12 presentaron un ratio de degradación anual promedio de 0.8%, es decir, dentro del 1% por año de degradación que ofrece el fabricante [58]. De forma similar, en [59] se presentan los resultados de un análisis de degradación con objeto de estudio de 56 paneles PV a lo largo de un período de vida de 22 años en términos de potencia; en este caso se evidencia una degradación anual del 1.4% y una degradación total de 30,89% al año 22 [59]. Finalmente, en [60] se realiza el análisis de paneles solares instalados en varias ubicaciones de Ghana, incluyendo instalaciones solares en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Kwame Nkrumah, la sede de la Comisión de Energía y el Hospital del Distrito de Wa. Para evaluar el rendimiento y degradación de los paneles se midió la potencia de salida de los módulos utilizando equipos de medición de potencia e irradiación, estas mediciones se realizaron desde setiembre del 2016 a setiembre del 2017; como resultados del estudio, se encontró que los paneles se degradaban a una ratio de 3.1% anual frente al ratio de degradación de 0.5-1% anual que ofrece el fabricante, evidenciando nuevamente una incongruencia con la garantía del panel fotovoltaico [60]. Otras técnicas más novedosas para evaluar de forma consistente el ratio de degradación de los paneles, consiste en el análisis de imágenes de electroluminiscencia y aprendizaje de máquina, donde se obtienen resultados similares a los ya expuestos [61].

## **2.2. Reciclaje de paneles Fotovoltaicos**

En el acápite anterior se mostró como está compuesto el panel PV a nivel estructural considerando los componentes de este, los materiales presentes y porcentaje de presencia de estos. Con esta información, es posible comprender de manera efectiva los procesos de reciclaje para paneles PV que se usan en la actualidad.

### **2.2.1. Estado del arte**

En general, el reciclaje de paneles PV y los procesos que existen tienen una connotación del tipo económica, es decir, lo que determina el interés de reciclaje de los materiales y elementos usados depende principalmente del porcentaje en peso respecto del total de un panel PV, el valor relativo económico de retorno, y la oferta y demanda del material en el mercado [62]. A continuación, se presentan los materiales dentro de un panel PV, en función al porcentaje en peso del panel, el precio de este en el mercado (USD/kg) y el interés de reciclaje [63].

Material	Porcentaje en peso respecto del total(%)	Precio(USD/Kg)	Interes de reciclaje?
Caja de conexiones	2	0.28 - 1*	Si
Silicio	2 - 3	1.7 - 2.7	Si
Vidrio	69 - 75	0.04 - 0.167	Si
Polimeros(EVA-PVF)	7	-	No
Cobre	0.6 - 1	4.4 - 7	Si
Plata	0.006 - 0.06	446 - 702	Si
Aluminio	10-20	1 - 2	Si
Otros	<0.4	-	No

**\*Precio expresado en USD/unidad**

Tabla 2: Materiales dentro de panel PV [63]

### 2.2.1.1. Procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos

El proceso de reciclaje en general puede ser dividido en un pretratamiento y un tratamiento de reciclaje; generalmente, se considera como pretratamiento al proceso de la separación mecánica o manual de la caja de conexiones del panel y los cables de conexión en el panel, en esta etapa el aluminio también es retirado de manera manual o por pirólisis para su recuperación metalúrgica; luego de esta etapa y retirados los elementos mencionados, la estructura del panel queda compuesta por el vidrio, el encapsulado EVA, las celdas solares y la lámina posterior [62]. Posteriormente, el tratamiento de los elementos restantes puede subdividirse en 2 formas excluyentes, dependiendo del valor económico del reciclaje: *Downcycling* o reciclaje de valor medio-bajo, que consiste en el reciclaje de los materiales que debido a su uso y/o naturaleza terminan contaminados al final de su uso (e.g. vidrio) y por tanto, con bajo valor en su reúso; y *Upcycling* o reciclaje de valor alto, el cual consiste en el reciclaje de materiales de mayor pureza al final de su vida útil o de más alto valor como metales (e.g. plata, silicio, aluminio), por tanto requiere de procesos más complejos que el *Downcycling*; además el *Upcycling* puede ser subdividido en una etapa de delaminación y otra etapa de reciclaje de celda solar (silicio y metales) [64]. El esquema general del proceso de reciclaje se muestra a continuación:

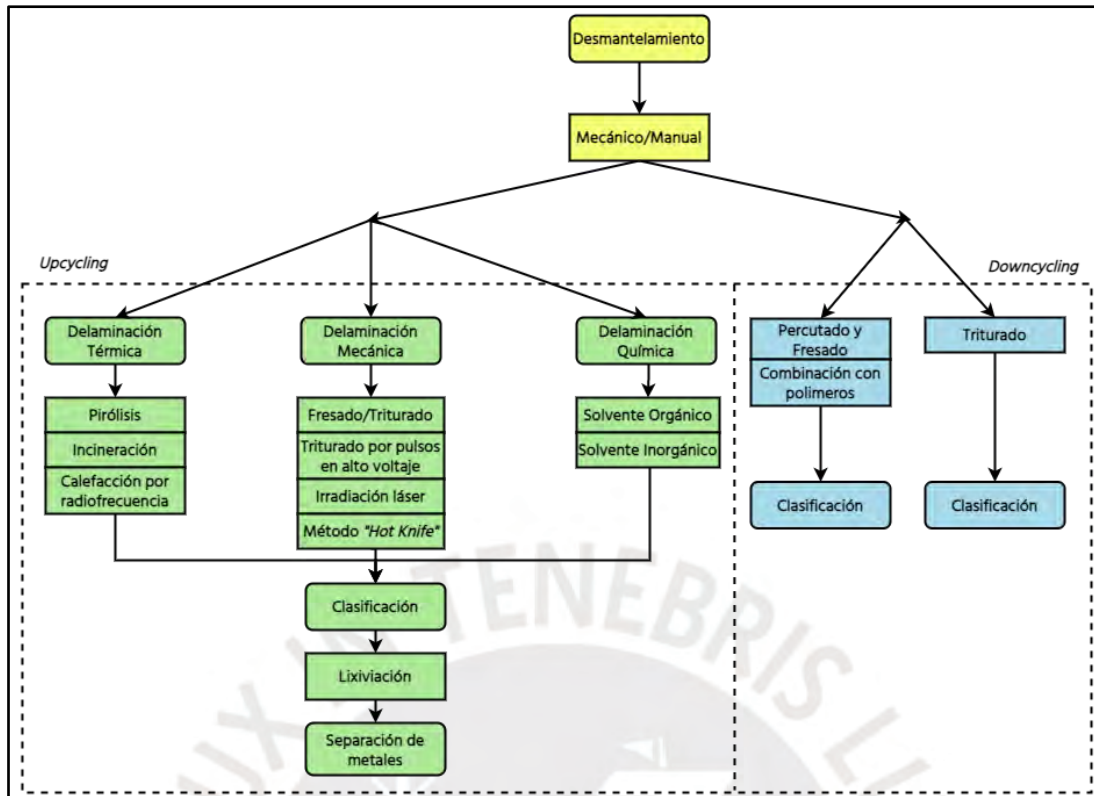


Figura 16: Proceso general de reciclaje de paneles PV [64]

### 2.2.1.1.1. Delaminación térmica

Los procesos de delaminación térmica consisten en la separación del módulo mediante descomposición térmica entre el vidrio templado y la celda solar [64]. En la actualidad los procesos de delaminación térmica comerciales son los siguientes:

Delaminación por pirólisis: Consiste en la separación del encapsulado EVA por medio de pirólisis, este tipo de calentamiento se caracteriza por no pasar por una oxidación química del encapsulado, por lo que el impacto ambiental se reduce. Existen 2 tipos de pirólisis: Pirólisis directa, consiste en calentar el panel PV a 500 °C durante 30 minutos y se caracteriza en una recuperación de vidrio del 80% y el retiro del 99% de los polímeros [62]; y Pirólisis de 2 pasos, donde primero se ablanda encapsulado EVA a bajas temperaturas (150 °C) durante un período de 5 minutos que permite retirar la lámina posterior, seguido de un calentamiento a temperaturas más altas (600 °C) por un lapso de 60 minutos, mediante este método se obtiene un ratio de separación del 100%.

Delaminación por radio frecuencia: También denominado calentamiento dieléctrico, consiste en la disipación de energía en forma de calor debido a la radiación electromagnética de microondas. En particular para la delaminación de paneles PV, el proceso consiste en someter

el panel a una potencia de 400W por 15 minutos [65], debido a que no genera un proceso de combustión, no se generan contaminantes secundarios.

Delaminación por Combustión: Consiste en una combustión completa del encapsulado EVA logrado mediante el calentamiento a 600 °C por 30 minutos, es importante tomar en consideración que este es un método reciente el cual aún se encuentra en estado experimental [62], además es importante notar que como cualquier proceso exotérmico existe una variable de energía liberada, la cual es despreciada para fines de este trabajo de investigación.

Si bien estos procesos son independientes y por lo general el panel pasa solo por un proceso de delaminación, cada uno conlleva un consumo energético distinto, por lo cual para el cálculo del consumo energético total se tomará en consideración el proceso con el consumo más elevado, es decir el proceso de delaminación mecánica.

#### **2.2.1.1.2. Delaminación mecánica**

La delaminación mecánica consiste en la separación de los materiales mediante operaciones mecánicas, este tipo de delaminación no siempre proporciona una separación completa de los materiales del panel PV y se suele complementar con una delaminación química como proceso posterior. Los procesos de delaminación mecánica pueden dividirse en cuatro:

Delaminación por Fresado/Triturado: Consiste en primer lugar en un proceso de trituración mediante máquinas con rotores de 2 hojas y un posterior fresado, en este proceso el vidrio es predominantemente recuperado mientras que la recuperación de metales resulta menos eficiente y escasa [62].

Delaminación por pulso de alto voltaje: Consiste en el uso de arcos eléctricos producidos en alto voltaje para poder realizar la delaminación del panel PV, en este procedimiento se recupera un mayor porcentaje de metal respecto del fresado/triturado [62].

Delaminación por método *Hot knife*: Consiste en el uso de una máquina de separación que usa una cuchilla especial a 180-200 °C, el módulo PV es colocado entre 2 rodillos que es desplazado hasta esta cuchilla, permitiendo así separar la celda solar del vidrio; se caracteriza por su corto tiempo de operación de 40-50s [66].

Delaminación por irradiación laser: Este procedimiento se caracteriza por no generar CO, no dañar el encapsulado EVA ni las células solares, sin embargo, los materiales se adhieren entre sí y otros métodos son necesarios para recuperar el material valioso como metales [62].

### 2.2.1.1.3. Delaminación química

Consiste en la delaminación mediante la separación por uso de solventes orgánicos o inorgánicos.

Solvente inorgánico: Consiste en la separación del encapsulado EVA mediante solvente inorgánico, en este método el vidrio es separado de la celda solar tras someter el módulo en una solución de ácido nítrico por 24 horas [64].

Solvente orgánico: Consiste en la disolución del encapsulado EVA en tricloroetileno a 80 °C durante 10 días; este proceso puede acelerarse utilizando radiación ultrasónica, un ejemplo de esto es la disolución orgánica completa del encapsulado EVA en dicloro benceno registrada en [67]

El cuadro resumen de los procesos de delaminación y las ratios de separación correspondientes se muestra a continuación:

Tecnología	Método	Ratio de separación(%)
<b>Delaminación térmica</b>	Radio frecuencia	N/A
	Pirolisis directa	>99
	Pirolisis de 2 pasos	100
	Incineración	100
<b>Delaminación mecánica</b>	Triturado/Fresado	91
	Pulsos de alto voltaje	N/A
	Método Hot Knife	100
	Irradiación láser	N/A
<b>Delaminación química</b>	Reactivo Orgánico	100
	Reactivo Inorgánico	95.8

Tabla 3: Tipos de delaminación y ratios de separación [62]

### 2.2.1.2. Eficiencia de los procesos de reciclaje

Respecto de la eficiencia de los procesos de reciclaje, es importante considerar los procesos de delaminación anteriormente mencionados, asimismo, otros factores que intervienen y están relacionados con la eficiencia de procesos de reciclaje de paneles PV son las etapas subsiguientes al proceso de delaminación, es decir al propio tratamiento de la celda solar. Para recuperar las obleas de silicio con un alto grado de pureza y de considerable grosor, es de suma importancia preseleccionar las condiciones del fresado químico. En función de la composición de la solución de grabado, es posible subdividir estas soluciones en 2 principalmente: soluciones que contienen ácido fluorhídrico y soluciones de fresado químico sin ácido fluorhídrico. En ese sentido se muestra el cuadro resumen del porcentaje de recuperación para

cada proceso de reciclaje de la propia celda fotovoltaica, así como el año en que se implementó cada procedimiento.

Tipo de proceso de fresado químico(Solución)	Porcentaje de recuperación(% de pureza) del Silicio	Año
Mezcla de 20% HNO <sub>3</sub> y 20% HF	>90%	2018
Mezcla de HNO <sub>3</sub> , 10% HF, NaOH	90%	2017
5 M HNO <sub>3</sub> , 90% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> @ 160 °C, 45% KOH @ 80 °C	80%	2016
60% HNO <sub>3</sub> , molienda mecánica, 30% KOH	90%	2016
HCl al 38 % a 50 °C, HF al 10 %, NaOH	90%	2015
48% HF, 70% HNO <sub>3</sub> , 97% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 99% CH <sub>3</sub> COOH	79%	2012

Tabla 4: Procesos de reciclaje y porcentaje de recuperación [64]

### 2.2.2. Economía circular

Desarrollado el concepto de eficiencia de los procesos de reciclaje, es posible abordar el concepto de economía circular en el contexto de los paneles fotovoltaicos. La economía circular implica un enfoque sostenible para todo el ciclo de vida de los paneles, desde su fabricación hasta su disposición final, con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de recursos y minimizar el impacto ambiental. En el caso de los paneles fotovoltaicos, la economía circular se materializa a través de las siguientes estrategias:

- Prolongación de la vida útil: La incorporación de tecnologías avanzadas en la fabricación de paneles permite extender su vida útil, retrasando su entrada en la fase de residuo.
- Recuperación y reciclaje de materiales valiosos: Al finalizar la vida útil de los paneles, se implementan procesos de reciclaje para recuperar materiales como silicio, vidrio, plásticos, cobre y otros metales, reduciendo la demanda de materias primas vírgenes.
- Reutilización y reincorporación en la cadena productiva: Los materiales recuperados pueden ser reutilizados en la fabricación de nuevos paneles u otros productos, cerrando el ciclo de los materiales y fomentando la reducción de residuos.
- Reducción del impacto ambiental: Al reciclar y reutilizar materiales, se disminuye la huella de carbono asociada a la extracción y procesamiento de nuevos recursos, contribuyendo a una gestión más sostenible de los residuos electrónicos.

En resumen, la economía circular en paneles fotovoltaicos no solo busca gestionar adecuadamente los residuos al final de la vida útil, sino también optimizar el uso de recursos durante todo el ciclo de vida del producto, alineándose con los principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

### 2.3. Impacto medioambiental

Conocidos los procedimientos que se llevan a cabo para el reciclaje de paneles PV, a continuación, se detallan las herramientas y conceptos que permiten asociar una carga y/o impacto medioambiental a cada uno de los mismos; esto resulta de utilidad para valuar mediante un análisis cualitativo-cuantitativo los procesos de reciclaje y a su vez permite dimensionar el impacto ambiental de los mismos.

#### 2.3.1. EPBT

El Energy Payback Time o por sus siglas EPBT de un panel PV, es el concepto asociado al factor de la Energía necesaria para la producción y puesta en marcha de un panel PV, por lo general, suele resultar de la suma de la energía necesaria en manufactura, instalación, energía usada durante la vida útil del panel y energía requerida para el desmantelamiento; respecto de la Energía que debe producir el panel para suplir y compensar la demanda de energía utilizada antes mencionada [68]. Por lo general, el factor de energía producida por el panel se suele considerar en unidad de energía por año, de tal forma que el EPBT se puede parametrizar en años y corresponde al tiempo necesario para que el panel produzca una energía tal que pueda suplir la demanda inicial de energía para su puesta en marcha, la fórmula que define este factor viene dada por la ecuación 2.3[68]:

$$EPBT_{\text{Años}} = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{EOL}}{\frac{E_{agen}}{\eta_G} - E_{O\&M}} \quad (2.3)$$

Donde:

$E_{mat}$ :	Energía requerida para disposición de materiales para construcción del panel PV
$E_{manuf}$ :	Energía utilizada para la manufactura del panel PV
$E_{trans}$ :	Energía requerida para el traslado del panel PV al lugar de instalación final
$E_{inst}$ :	Energía requerida para la instalación del panel PV y puesta en marcha
$E_{EOL}$ :	Energía requerida para la gestión de residuos del panel PV al final de su vida útil
$E_{agen}$ :	Capacidad de producción energética anual de panel PV
$\eta_G$ :	Factor de eficiencia energética
$E_{O\&M}$ :	Demanda de energía primaria anual para la producción de energía de un panel PV

#### 2.3.2. Huella de carbono

La huella de carbono es un factor parametrizado que se utiliza para cuantificar la cantidad de emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero a la atmósfera asociados a determinada actividad y se mide en unidad de masa de CO<sub>2</sub> [69]. En general, para la

construcción o elaboración de determinado producto, el concepto de huella de carbono se puede extender para dimensionar las emisiones de gases de efecto invernadero de extracción de materiales, producción, transporte, uso y gestión de residuos [70]. En términos de uso, para calcular la huella de carbono, se deben identificar y cuantificar las emisiones de GEI asociadas con el producto, servicio, organización o evento en cuestión; esto puede incluir emisiones directas o indirectas durante la producción y obtención de materias primas, posteriormente se utilizan factores de conversión.

### 2.3.3. Factor de conversión

Para poder aplicar una magnitud en términos de huella de carbono a cierta actividad, se suelen utilizar factores de conversión; los factores de conversión son parámetros ya establecidos que permiten expresar una unidad o parámetro físico como kilogramo o litro de determinada sustancia o actividad en términos de huella de carbono, es decir, Kg CO<sub>2</sub>; las emisiones de gases de efecto invernadero suelen calcularse en función al factor de conversión/emisión usando la siguiente relación dada por la ecuación 2.4 [71]:

$$\text{Huella de Carbono}(\text{CO}_2\text{equivalente}) = D.A * F.E \quad (2.4)$$

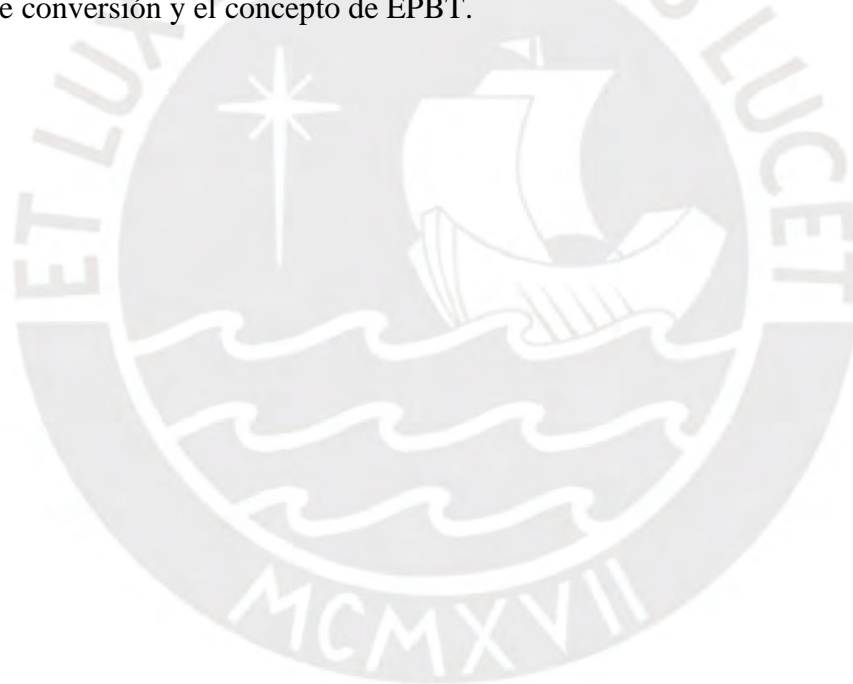
*D.A:* Dato de actividad, es el parámetro físico que describe la actividad

*F.E:* Factor de emisión, supone la cantidad de GEI emitidos por unidad del D.A

Si bien estimar factores de conversión puede resultar complicado, en la actualidad diversas organizaciones como la Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) o la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), mediante estudios científicos y técnicos, establecen informes, estándares y guías para establecer factores de conversión, entre estos se tiene a "*The IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*" y el "*The US Environmental Protection Agency's Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sink*". El primero de estos documentos constituye un conjunto de directrices desarrolladas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) para que los países asociados estandaricen la medición de sus emisiones de gases de efecto invernadero. Las directrices proporcionan información detallada sobre cómo calcular y reportar las emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes fuentes, incluyendo la energía, la agricultura, el transporte y la gestión de residuos [72]; el segundo documento mencionado se realiza de manera anual y detalla las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en los Estados Unidos. El informe cubre todas las principales emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y

hexafluoruro de azufre. De esta manera, proporciona información clave sobre la cantidad y la fuente de las emisiones de gases de efecto invernadero en los Estados Unidos; utilizando esta información, las empresas y las organizaciones pueden evaluar su propia huella de carbono y trabajar para reducirla [73].

En síntesis, describir los elementos desarrollados a lo largo del capítulo será de suma utilidad para el desarrollo de los siguientes capítulos; en primer lugar conocer la estructura y materiales del panel PV permite conocer de qué materiales se basará el análisis cuantitativo, describir los procesos de reciclaje de los mismos constituye el análisis cualitativo en sí; el concepto de potencia, eficiencia y tiempo de vida de un panel PV se asocia con la introducción de la garantía limitada de potencia y los mapas de irradiancia; finalmente, para efectuar el balance energético se requieren herramientas que permitan hacer una equivalencia entre la energía asociada a un material y/o proceso respecto de su impacto ambiental o huella de carbono, para ello se utilizan los factores de conversión y el concepto de EPBT.



### **3. CAPÍTULO 3: BALANCE ENERGÉTICO Y DIMENSIONAMIENTO DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL**

#### **3.1. Metodología para el análisis**

##### **3.1.1. Descripción y consideraciones previas**

En este capítulo se llevará a cabo el análisis cuantitativo de la cadena de reciclaje principal de paneles fotovoltaicos. Se identifican los procedimientos involucrados en cada subproceso y las dimensiones y características a considerar en relación de cada uno de los tres casos de estudio seleccionados en función al consumo energético. Este análisis permitirá identificar parámetros que podrán ser utilizados para asociar y dimensionar cualquier otra instalación o aplicación de paneles fotovoltaicos. Es importante señalar que la selección de los tres casos de estudio responde a la intención de analizar en profundidad escenarios representativos de bajo, medio y alto consumo energético, permitiendo así explorar la variabilidad de los procesos de reciclaje en diferentes contextos. Sin embargo, debido a la complejidad y diversidad de las instalaciones fotovoltaicas existentes, los resultados obtenidos deben interpretarse como aproximaciones específicas a estos casos. Cabe destacar que el análisis cualitativo correspondiente a esta cadena fue desarrollado en el capítulo precedente. Por lo tanto, este capítulo se enfocará en utilizar los procesos ya descritos y conocidos para llevar a cabo el análisis cuantitativo. Primero, utilizando factores de conversión se traducirá cada proceso descrito en el acápite 2.2.1 en términos de energía; luego, una vez obtenido el consumo energético total y considerando la capacidad de producción energética se realizará el cálculo del EPBT según lo descrito en 2.3.1; finalmente, de forma análoga se utilizarán factores de conversión revisados en 2.3.3 en términos de huella de carbono para dimensionar el impacto ambiental del proceso de reciclaje en cada caso de estudio en base a lo indicado en 2.3.2.

##### **3.1.2. Casos de estudio para análisis**

La elección de los casos de estudio se realizó considerando el nivel de consumo energético de cada uno, con el fin de analizar la eficiencia y sostenibilidad de la instalación de paneles solares en diferentes contextos. Se seleccionaron tres casos representativos de diferentes niveles de consumo: bajo, medio y alto. Los casos que se seleccionaron fueron los siguientes:

En primer lugar, en el primer caso o caso de consumo bajo se tiene un grupo de 5 hogares rurales en Puno que consumen alrededor de 10 kWh al día que es la cantidad que se considera en [74][75], lo que es suficiente para cubrir las necesidades básicas de una vivienda con 3 o 4

integrantes. En este caso, el objetivo es evaluar si la instalación de paneles solares es una alternativa eficiente y sostenible para la generación de energía en zonas rurales y con bajo consumo energético.

En el segundo caso se evalúa el caso del Instituto de Ingenieros de Minas, ubicado en Lima, el cual cuenta con 52 paneles solares de 400 Wp, que se traducen en una potencia de 20.8 kW [69]. Este es un caso de consumo medio, ya que se trata de una institución educativa que requiere de una cantidad moderada de energía para cubrir sus necesidades de iluminación y uso de equipos electrónicos.

Finalmente, en el tercer caso se analiza la planta de energía solar Rubí, ubicada en Moquegua, que cuenta con una capacidad nominal de 179.5 MW y está compuesta por 560,880 paneles solares de 320 Wp de potencia nominal [74]. Este es un caso de consumo alto, ya que se trata de una planta de gran envergadura diseñada para generar energía a gran escala y abastecer a una amplia zona geográfica.

La elección entre estos tres casos de estudio depende de la potencia generada y consumida en cada uno. Aunque la capacidad de producción de energía de la instalación aumenta en cada caso, también lo hace la cantidad de materiales necesarios, específicamente en términos de paneles fotovoltaicos. Esto, a su vez, afecta el Tiempo de Retorno Energético (EPBT). Por lo tanto, es crucial entender cómo varía el EPBT en relación con diferentes tipos de instalaciones fotovoltaicas y sus respectivos consumos. De forma detallada, las características y especificaciones para los casos de estudio 1 y 3 se presentan en [74]; asimismo con el objetivo de garantizar la precisión de los datos y las características de los paneles fotovoltaicos que se utilizan en cada caso, se opta por tomar como referencia las hojas de datos de los paneles en los casos de estudio anteriormente mencionados [76][77]. Por otro lado, para considerar las características de la instalación del caso 2, se toma como referencia que el proveedor y serie de paneles PV de la empresa ENGIE (encargada de la concesión para la instalación de los paneles en el caso de estudio 2 [78]) será el mismo el proveedor de paneles que se contrató en el caso de central fotovoltaica RUPHAY [79], considerando una serie con la potencia nominal acorde al caso (400 Wp) [80]; mientras que para el ratio de irradiación anual se utiliza el Atlas Global Solar [81]. Respecto del caso de estudio de consumo bajo, la empresa proveedora de paneles solares para proyectos de electrificación rural en el Perú es Energón, perteneciente al grupo Tozzi Green, por lo tanto se escogerán paneles de procedencia italiana con una potencia nominal de 120Wp, ya que es la potencia que el proveedor asegura, es la usada para este tipo de instalaciones, las características para este tipo de paneles se muestran en [82]; respecto del

caso de consumo medio, como se mencionó anteriormente la empresa encargada de la concesión es ENGIE y para los paneles de 400Wp se consideran las características mostradas en [80]; respecto del caso de consumo alto, de la central solar Rubí, se tomarán en consideración los datos brindados por ENEL Perú, que aseguran que los paneles de 320Wp de potencia nominal proceden de Risen Energy[83].

El resumen de las características y especificaciones en cada caso de estudio, se presentan en la tabla 5:

<b>Parámetro</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>
Número de paneles	22	52	560880
Potencia requerida (MW)	0.0020	0.0208	179.5
Potencia nominal por panel (Wp)	120.0	400.00	320.0
Longitud de la celda solar (mm)	156.750	-	156
Ancho de la celda solar (mm)	156.750	-	156
Número de celdas por panel	36	120	72
Peso del panel (kg)	8.50	21.00	26.00
Eficiencia del panel	15	21.1	17.5
Ratio de irradiación anual (AIR) (kWh/m <sup>2</sup> )	2374.60	1785.30	2735.90
Longitud del panel (m)	1.130	1.754	1.956
Ancho del panel(m)	0.668	1.096	0.992

*Tabla 5: Cuadro comparativo de casos de estudio*

## **3.2. Análisis cuantitativo**

### **3.2.1. Análisis cuantitativo de procesos**

El análisis cuantitativo se basará en la evaluación de los procesos de desmantelamiento, delaminación, recuperación de materiales, clasificación y lixiviación, los cuales se consideran críticos para la gestión sostenible de los paneles solares al final de su vida útil. Como se identifica en el análisis cualitativo, existe una gran variedad de procesos que se utilizan para el reciclaje de paneles PV [57][59]; en función a los procedimientos que se siguen a nivel industrial/comercial por los principales proveedores de paneles PV, la ruta a analizar será la mostrada en la figura 17:

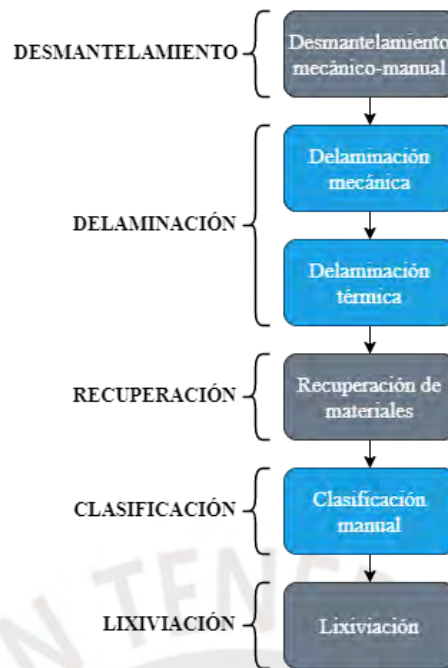


Figura 17: Ruta de reciclaje de paneles PV

Como última consideración, para el cálculo del consumo energético en unidades de Joules, se utilizarán factores de conversión, los que usarán con mayor concurrencia se les definirá como:

- $K_{kWh-MJ}$ : Factor de conversión de unidades de kilovatios-hora (kWh) a mega joule (MJ),  $K_{kWh-MJ} = 3.6$
- $K_{kcal-MJ}$ : Factor de conversión de unidades de kilocalorías (kcal) a mega joule (MJ),  $K_{kcal-MJ} = 4.184E-03$

### Desmantelamiento

Para la subetapa de desmantelamiento, en base a lo mencionado en [64], se establece que para llevar a cabo el desmontaje y desmantelamiento de los módulos, se utilizan herramientas como sierras eléctricas, cuya potencia nominal comercial es de 1500W [84]; taladro eléctrico, con una potencia nominal comercial de 750W [85]; y pistolas de calor, con una potencia nominal comercial promedio de 1500W [86]; de esta manera se obtiene una potencia nominal promedio por hora de 1250W asociado a herramientas para el desmantelamiento.

$$P_{prom} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (3.1)$$

Además del consumo energético de las herramientas utilizadas en la fase de desmantelamiento, es importante considerar el esfuerzo humano requerido para estas tareas; respecto del número de operarios necesarios en ambos casos, se tomará como referencia a [74], según esta

documentación, para el primer caso basta con 2 operarios para realizar esta operación; para el segundo caso, son necesarios 20 operarios; finalmente para el tercer caso, son necesarios 300 operarios. Este número de operarios permite cuantificar que el tiempo de desmantelamiento por panel sea de 1h, al multiplicar esta cifra por el número de paneles en cada caso, se puede estimar el número total de horas necesarias para llevar a cabo esta fase. A partir de este dato, se puede calcular el número de jornadas de trabajo de ocho horas necesarias para completar el proceso. Según [87], este tipo de esfuerzo humano requiere un consumo calórico promedio de 2000 kcal por jornada. Teniendo la potencia asociada a las herramientas, el número de horas que tomará el proceso y el consumo calórico; el cálculo del consumo energético de esta etapa viene dado por:

$$C_{TH} = P_{prom} * N_D * N_P * K_{kWh-MJ} \quad (3.2)$$

- $C_{TH}$ : Consumo total de energía por herramientas [MJ]  
 $P_{prom}$ : Potencia promedio por consumo de herramientas [MW]  
 $N_D$ : Número de horas por desmantelamiento[h]  
 $N_P$ : Número de paneles  
 $K_{kWh-MJ}$ : Constante de factor de conversión de W-h a Joules

$$C_{TE} = \frac{N_{Op} * C_c * N_P * N_D * K_{kcal-MJ}}{N_{HJ}} \quad (3.3)$$

- $C_{TE}$ : Consumo total de energía por esfuerzo humano [MJ]  
 $N_{Op}$ : Número de operarios  
 $C_c$ : Consumo calórico por jornada de trabajo [kcal/jornada]  
 $N_D$ : Número de horas por desmantelamiento por panel (1h) [h]  
 $N_{HJ}$ : Número de horas equivalente a una jornada (8h) [h/jornada]  
 $K_{kcal-MJ}$ : Constante de factor de conversión de calorías a Joules

DESMANTELAMIENTO	CASO 1	CASO 2	CASO 3
<b>a. Nro Paneles</b>	22	52	560,880
<b>b. Peso de cada panel (kg)</b>	8.5	21.0	26.0
<b>c. Nro Operarios</b>	2	24	300
<b>d. Potencia nominal promedio por uso de herramientas (W)</b>	1250	1250	1250
<b>e. Número de horas para desmantelamiento por panel (h)</b>	1	1	1
(a. * e.) Número de horas total por caso (h)	22.00	52	560,880
((a. * e.) ÷ 8) Número de jornadas en función del tiempo (jornadas-8h)	2.75	6.50	70,110
<b>f. Factor de consumo calórico (Trabajo ligero) (kcal/jornada-8h)</b>	2000	2000	2000
(c. * ((a. * e.) ÷ 8)) * f.) Consumo calórico total por caso (kcal)	11000.00	312000.00	4.21E+10
((c. * ((a. * e.) ÷ 8)) * f.) * $K_{kcal-MJ}$ ) <b>Consumo calórico total por caso (MJ)</b>	46.02	1,305	1.76E+08
(a. * d. * e.) Consumo total por herramientas (kWh)	27.50	65	7.01E+05
((a. * d. * e.) * $K_{kWh-MJ}$ ) <b>Consumo total por herramientas (MJ)</b>	99.00	234	2.52E+06
<b>Consumo TOTAL (MJ)</b>	145.02	1,539.41	1.79E+08

Tabla 6: Consumo energético en la etapa de desmantelamiento

## Delaminación

Según [88], el proceso de delaminación en las empresas vigentes de la industria se subdivide en una delaminación física y una delaminación por pirólisis; de acuerdo con el análisis cualitativo realizado en el capítulo anterior, se identificó un subproceso de delaminación mecánica y un subproceso de delaminación química. En la delaminación mecánica se aplica la técnica de fresado/triturado, en [88] también se describe que una de las herramientas estándar que se utilizan para este fin es la Retsch SM 2000, con una potencia nominal de 2,2kW [89]; por otro lado, la capacidad de esta herramienta en función a la relación peso (kg) por tiempo (h) es de 0.14 h/kg, considerando las capacidades de la herramienta según el reporte de pruebas para componentes electrónicos elaborado por Restch [90]. Con esta información, se calcula el número total de horas de trabajo necesarias para procesar todos los paneles de la cadena de reciclaje principal y mediante este dato y el consumo promedio de potencia, se puede calcular el consumo total en la fase de delaminación mecánica; en esta ecuación resultante en esta etapa es:

$$C_{TDM} = P_{SM200} * C_{TW} * N_P * W_P * K_{kWh-MJ} \quad (3.4)$$

- $C_{TDM}$ : Consumo total de energía por delaminación mecánica [MJ]  
 $P_{SM200}$ : Potencia nominal promedio de la SM200 de Restch [kW]  
 $C_{TW}$ : Número de horas por desmantelamiento[h]  
 $N_P$ : Número de paneles

$W_p$ : Peso de cada panel [kg]  
 $K_{kWh-MJ}$ : Constante de factor de conversión de W-h a Joules

Delaminación Mecánica	CASO 1	CASO 2	CASO 3
<b>a. Nro Paneles</b>	22	52	560,880
<b>b. Peso de cada panel [kg]</b>	8.5	21.0	26.0
<b>c. Potencia de Maquinarias - SM200 Retsch (kW)</b>	2.2	2.2	2.2
d. SM 200 Retsch - Capacidad de procesado de material (kg)	0.60	0.60	0.60
e. SM 200 Retsch - Tiempo de procesamiento (h)	0.08	0.08	0.08
<b>(e. ÷ d.) Capacidad de la SM 200 Retsch (h/kg)</b>	0.14	0.14	0.14
<b>(c. * (e. ÷ d.)) Consumo energético por eso de panel (kWh/kg)</b>	0.31	0.31	0.31
<b>(a. * b. * c. * (e. ÷ d.)) Consumo total por delaminación mecánica (kWh)</b>	57.14	333.67	4.46E+06
<b>(a. * b. * c. * (e. ÷ d.)) * <math>K_{kWh-MJ}</math> Consumo total por delaminación mecánica (MJ)</b>	205.70	1,201.20	1.60E+07

Tabla 7: Consumo energético en la etapa de delaminación mecánica

Por otro lado, respecto de la delaminación térmica, esta utiliza la técnica de pirolisis directa para separar los materiales que componen el panel. En el proceso de pirólisis, para estimar el consumo energético se utiliza el concepto de calor específico para cada uno de los elementos más relevantes y de mayor presencia en el panel, que ya ha sido procesado [64]. Estos elementos son el encapsulado EVA, el vidrio y el silicio; en el análisis cualitativo desarrollado en el capítulo anterior, se dieron a conocer los porcentajes en peso de cada uno de estos materiales en relación con el peso total del panel, por lo que ya es un dato conocido. Para calcular el consumo energético de esta etapa, se multiplican la temperatura de operación y el tiempo de tratamiento por pirolisis por el calor específico de cada material presente y su cantidad, esta última magnitud se obtiene a partir del porcentaje en peso de los materiales y el peso total del panel. De esta forma, la fórmula a utilizar para estimar el consumo energético en esta etapa es la siguiente:

$$C_{TDT} = T_p * H_p * \sum_i \frac{W_p * C_{e_i} * W\%_i}{1000} \quad (3.5)$$

$C_{TDT}$ : Consumo total de energía por delaminación térmica [MJ]  
 $T_p$ : Tiempo del tratamiento de pirolisis por panel [h]  
 $H_p$ : Temperatura de operación necesaria para el proceso [C°]  
 $W_p$ : Peso de cada panel [kg]  
 $C_{e_i}$ : Calor específico del material “i” involucrado [kJ/kg°C]  
 $W\%_i$ : Porcentaje en peso del material “i” respecto del peso total [%]  
 $i$ : Indicador representativo para cada material [Vidrio, EVA, Silicio]  
 $K = \frac{1}{1000}$ : Constante de factor de conversión de kJ a MJ

Delaminación térmica	CASO 1	CASO 2	CASO 3
a. Nro Paneles	22	52	560,880
b. Peso de cada panel [kg]	8.5	21.0	26.0
c. Tiempo de tratamiento por pirólisis por panel [h]	0.5	0.5	0.5
d. Temperatura de operación necesaria por panel [°C]	650	650	650
e1. Calor específico promedio encapsulado EVA [kJ/kg°C]	2.3	2.3	2.3
e2. Calor específico promedio vidrio [kJ/kg°C]	1.68	1.68	1.68
e3. Calor específico promedio silicio [kJ/kg°C]	0.84	0.84	0.84
f1. Porcentaje en peso EVA [%]	7%	7%	7%
f2. Porcentaje en peso vidrio [%]	75%	75%	75%
f3. Porcentaje en peso silicio [%]	3%	3%	3%
$(b. * c. * d. * (\sum_i \frac{e_i * f_i}{1000}))$ Consumo por delaminación térmica por panel (MJ)	42.32	104.62	129.4
$(a. * b. * c. * d. * (\sum_i \frac{e_i * f_i}{1000}))$ Consumo total por delaminación térmica (MJ)	9.31E+02	5.44E+03	7.26E+07

Tabla 8: Consumo energético en la etapa de delaminación térmica

Como se indicó anteriormente, para el cálculo del EPBT se tomará en consideración el tipo de delaminación que conlleva mayor consumo energético siendo esta la delaminación mecánica.

### Recuperación de materiales

En la etapa de recuperación de materiales, se realiza la transformación de las obleas de silicio a silicio poroso, el cual es un material muy utilizado en la fabricación de paneles solares. Para lograr esto, se requiere de un proceso de remoción de plata y aluminio que se lleva a cabo mediante el uso de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) y ácido clorhídrico ( $HCl$ ), respectivamente [64]. Cada remoción toma aproximadamente 1.5 horas y se realiza mediante el uso de un limpiador ultrasónico con una potencia de 150W. Una vez que se tiene la estimación del tiempo total de remoción de ambos materiales, se puede calcular el consumo energético de esta etapa en función del tiempo y la potencia utilizada. La fórmula resultante para este proceso es:

$$C_{TR} = P_{US} * (T_{HNO_3} + T_{HCl}) * K_{kWh-MJ} \quad (3.6)$$

- $C_{TR}$ : Consumo total por recuperación [MJ]  
 $P_{US}$ : Potencia nominal de limpiador ultrasónico [kW]  
 $T_{HNO_3}$ : Tiempo de tratamiento en  $HNO_3$  [h]  
 $T_{HCl}$ : Tiempo de tratamiento en  $HCl$  [h]  
 $K_{kWh-MJ}$ : Constante de factor de conversión de W-h a Joules

Recuperación	CASO 1	CASO 2	CASO 3
a. Nro Paneles	22	52	560,880
b. Tiempo para remoción de plata y aluminio en HNO <sub>3</sub> (h)	1.5	1.5	1.5
c. Tiempo para remoción de plata y aluminio en HCl (h)	1.5	1.5	1.5
d. Potencia de limpiador ultrasónico (W)	150	150	150
(d. * (b. + c.) ÷ 1000)	0.45	0.45	0.45
Consumo por recuperación por cada panel (kWh)			
(a.* d. * (b. + c.) ÷ 1000)	9.900	23.40	2.52E+05
Consumo total por recuperación (kWh)			
(K <sub>kWh-MJ</sub> * d. * (b. + c.) ÷ 1000)	35.640	84.24	9.09E+05
Consumo total por recuperación (MJ)			

Tabla 9: Consumo energético en la etapa de recuperación de materiales

### Clasificación

En la etapa de clasificación manual, se tomará en consideración el esfuerzo energético por los mismos operarios que en la etapa de desmantelamiento, considerando la misma carga calórica de trabajo ligero variando el número de jornadas ya que la carga energética no podría ser la misma que en la etapa de desmantelamiento, en función al número de operarios que se encarga de la clasificación se cuantificará el número de jornadas. La fórmula que se seguirá para este procedimiento es la siguiente:

$$C_{TC} = N_{Op} * C_c * N_J * K_{kWh-MJ} \quad (3.7)$$

- $C_{TC}$ : Consumo total por clasificación [MJ]  
 $N_{Op}$ : Número de operarios  
 $C_c$ : Consumo calórico por jornada [Kcal/jornada]  
 $N_J$ : Número de jornadas necesarias para la clasificación  
 $K_{kWh-MJ}$ : Constante de factor de conversión de W-h a Joules

CLASIFICACIÓN	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Consumo energético por jornada (kcal)	4,000.00	4.80E+04	2.19E+08
Número de Jornadas	1	1	365
Consumo energético total (Clasificación manual) (MJ)	1.67E+01	2.01E+02	9.16E+05

Tabla 10: Consumo energético en la etapa de clasificación

### Lixiviación

En la etapa de lixiviación, se lleva a cabo la disolución de los materiales restantes, tales como la plata y otros metales valiosos en soluciones ácidas. Para ello se requiere una solución de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 5%, que se calienta a temperatura ambiente y se hace circular a través de los residuos [64]. El volumen de la solución y el tiempo promedio del proceso son factores clave en la eficiencia de la extracción de los metales valiosos. Además, se necesita una potencia eléctrica para bombear y agitar la solución. Con todos estos factores en cuenta, se calcula el consumo energético total de esta etapa. La fórmula por seguir es:

$$C_{LX} = V_{sol} * T_{OLX} * P_{LX} * n * K_{kWh-MJ} \quad (3.8)$$

- $C_{LX}$ : Consumo total por lixiviación [MJ]  
 $V_{sol}$ : Volumen de la solución [L]  
 $T_{OLX}$ : Tiempo del proceso de lixiviación [Kcal/jornada]  
 $P_{LX}$ : Potencia asociada por unidad de volumen [W/L]  
 $n$ : Eficiencia del proceso de lixiviación [%]  
 $K_{kWh-MJ}$ : Constante de factor de conversión de W-h a Joules

LIXIVIACIÓN	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Número de paneles	22	52	560,880
Temperatura Ambiente (C)	25	25	25
Volumen de solución (L)	50	50	50
Tiempo promedio del proceso (h)	2	2	2
Eficiencia del proceso	80%	80%	80%
Potencia necesaria en proceso (W)	500	500	500
<b>Consumo energético por lixiviación por panel (kWh)</b>	40	40	40
<b>Consumo total por lixiviación (kWh)</b>	1,375.00	3,250.00	3.51E+07
<b>Consumo total por lixiviación (MJ)</b>	4,950.00	11,700.00	1.26E+08

Tabla 11: Consumo energético en la etapa de lixiviación

### 3.2.2. Balance energético del proceso de reciclaje

Sumando los consumos energéticos de las etapas descritas previamente, es posible obtener el Energy Payback Time (EPBT), que es el tiempo necesario para que el panel solar produzca la misma cantidad de energía que la que se utilizó para su producción. El cuadro a continuación muestra la energía producida por cada caso de estudio y la energía consumida durante el proceso de reciclaje de los paneles que componen la instalación fotovoltaica en cada caso. De esta forma se calcula el EPBT expresado en años; finalmente los datos y resultados son mostrados en la tabla 12:

Evaluación Final EPBT	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Energía total requerida	6.08E+03	1.90E+04	3.79E+08
Energía total producida	1.70E+04	1.08E+05	1.50E+09
<b>EPBT(Años)</b>	<b>0.3568</b>	<b>0.1748</b>	<b>0.2527</b>

Tabla 12: Energy Payback Time en casos de estudio

### 3.3. Dimensionamiento del Impacto medioambiental

Después de haber calculado el EPBT, se procede a estimar la huella de carbono asociada al proceso de reciclaje de paneles solares. Para ello, es necesario tomar en cuenta los factores de conversión para cada uno de los subprocesos descritos anteriormente, los cuales se utilizan para estimar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero generadas durante el proceso de reciclaje. Estos factores de conversión se basan en la cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq) emitido por unidad de energía consumida en cada subproceso, y pueden variar según la tecnología y las condiciones específicas de la planta de reciclaje. Al estimar la huella de carbono, se obtiene información importante sobre el impacto ambiental del proceso de reciclaje y permite identificar oportunidades de mejora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al reciclaje de paneles solares.

#### 3.3.1. Cálculo de huella de carbono

##### Desmantelamiento

Para la etapa de desmantelamiento se está considerando el factor de conversión que corresponde al carbono necesario para hacer funcionar las herramientas eléctricas, ya que es la fuente de energía más convencional en el Perú. Este factor de conversión tiene en cuenta las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan en la producción y el uso de la energía eléctrica. Por otro lado, para el consumo humano se utiliza otro factor de conversión que tiene en cuenta las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero que se generan en la producción de los alimentos y en la actividad física de los trabajadores.

PROCESO	CASO 1	CASO 2	CASO 3	F.C (tCO <sub>2</sub> /MJ)
<b>DESMANTELAMIENTO</b>				
Consumo energético por consumo humano (MJ)	46.02	1305.41	1.76E+08	1.26E-04
Consumo energético por uso de herramientas (MJ)	99.00	234.00	2.52E+06	1.26E-04
HUELLA DE CARBONO (tCO <sub>2</sub> )	1.83E-02	1.94E-01	2.25E+04	

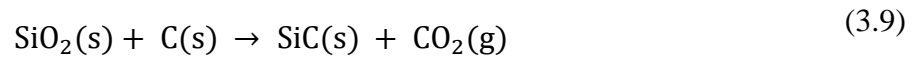
Tabla 13: Huella de carbono por desmantelamiento

##### Delaminación

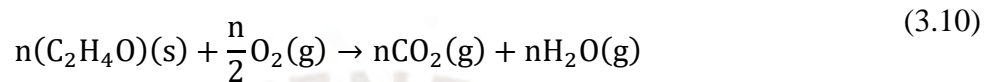
Sobre el proceso de delaminación, al igual que en el cálculo del EPBT, se subdivide en delaminación mecánica y térmica.

Respecto de la delaminación mecánica, se utilizará el dato obtenido anteriormente sobre el consumo energético, y multiplicar el factor de conversión de la fuente de la energía eléctrica (Carbón) que se utiliza en [74], para dimensionar la huella de carbono asociada.

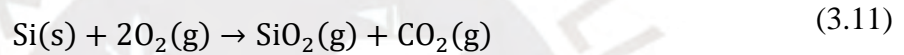
Respecto de la delaminación térmica, Durante el proceso de pirólisis, los materiales se descomponen térmicamente en presencia de oxígeno para formar dióxido de carbono, agua y otros subproductos. La reacción química para la descomposición del vidrio en dióxido de silicio y dióxido de carbono es:



La reacción química para la descomposición del EVA en dióxido de carbono y otros subproductos es:



La reacción química para la descomposición del silicio cristalino en dióxido de silicio y dióxido de carbono es:



En función a las ecuaciones estequiométricas anteriormente descritas, es posible encontrar el número de moles que se liberan de CO<sub>2</sub> que se liberan y en función a la masa de cada elemento involucrado en el proceso de pirólisis calcular el número de kg de CO<sub>2</sub> que se liberan, estos datos son presentados en la tabla 14:

<b>Térmica (Pirólisis directa)</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>
Masa presente de Vidrio [kg]	6.375	15.750	19.500
Masa presente de EVA [kg]	0.595	1.470	1.820
Masa presente de Silicio [kg]	0.255	0.630	0.780
Masa molar promedio del Vidrio [g/mol]	60.08	60.08	60.08
Masa molar promedio del EVA [g/mol]	100	100	100
Masa molar del silicio [g/mol]	28.09	28.09	28.09
Número de moles de Vidrio	106.109	262.150	324.567
Número de moles de EVA	5.95	14.7	18.2
Número de moles de Silicio	9.078	22.428	27.768
Número de moles de CO <sub>2</sub> por mol de Vidrio	1	1	1
Número de moles de CO <sub>2</sub> por mol de EVA	1	1	1
Número de moles de CO <sub>2</sub> por mol de Silicio	1	1	1
Número de moles totales de CO <sub>2</sub> [mol]	121.14	299.28	370.54
Masa molar de CO <sub>2</sub> [g/mol]	44.01	44.01	44.01
Total de emisiones de CO <sub>2</sub> por panel [tCO <sub>2</sub> ]	0.00533	0.01317	0.01631
Total de emisiones de CO <sub>2</sub> por caso [tCO <sub>2</sub> ]	0.11729	0.68490	9.15E+03
Total de consumo energético por delaminación mecánica [MJ]	9.31E+02	5.44E+03	7.26E+07

Tabla 14: Huella de carbono por delaminación térmica

Finalmente, se presenta la huella de carbono total calculada en la etapa de delaminación:

<b>PROCESO</b>				
<b>DELAMINACION</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>F.C (tCO<sub>2</sub>/MJ)</b>
Consumo energético por delaminación térmica (MJ)	9.31E+02	5.44E+03	7.26E+07	1.26E-04
Consumo energético por delaminación mecánica (MJ)	205.70	1201.20	1.60E+07	1.26E-04
HUELLA DE CARBONO (tCO <sub>2</sub> )	2.59E-02	1.51E-01	2.02E+03	

*Tabla 15: Huella de carbono por proceso de delaminación general*

### Recuperación de materiales

En relación con la recuperación de materiales se realizará el proceso análogo al proceso de delaminación mecánica, considerando el factor de conversión del carbón.

<b>PROCESO</b>				
<b>RECUPERACION DE MATERIALES</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>F.C (tCO<sub>2</sub>/MJ)</b>
Consumo total por recuperación por caso (MJ)	35.64	84.24	9.09E+05	1.26E-04
HUELLA DE CARBONO (tCO <sub>2</sub> )	4.49E-03	1.06E-02	1.14E+02	

*Tabla 16: Huella de carbono por recuperación de materiales*

### Clasificación

Para el proceso de clasificación, dado que hay una considerable cantidad de esfuerzo humano involucrado, se partirá de la misma consigna que en el proceso de desmantelamiento y se utilizará un factor de conversión basado en el consumo humano.

<b>PROCESO</b>				
<b>CLASIFICACION</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>F.C (tCO<sub>2</sub>/MJ)</b>
Consumo energético total (Clasificación manual) (MJ)	1.67E+01	2.01E+02	9.16E+05	1.26E-04
HUELLA DE CARBONO (tCO <sub>2</sub> )	2.11E-03	2.53E-02	1.15E+02	

*Tabla 17: Huella de carbono por clasificación*

### Lixiviación

Para la etapa de lixiviación se utilizará la información relacionada a la potencia de la maquinaria utilizada para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> de forma similar al proceso de recuperación de materiales.

<b>PROCESO</b>				
<b>LIXIVIACION</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>F.C (tCO<sub>2</sub>/MJ)</b>
Consumo total por lixiviación (MJ)	4950	1.17E+04	1.26E+08	1.26E-04
HUELLA DE CARBONO (tCO <sub>2</sub> )	6.24E-01	1.47E+00	1.59E+04	

*Tabla 18: Huella de carbono por lixiviación*

De esta forma el resultado de la huella de carbono final asociado a cada caso de estudio es:

PROCESO	CASO 1	CASO 2	CASO 3	F.C (tCO <sub>2</sub> /MJ)
<b>DESMANTELAMIENTO</b>				
Consumo energético por consumo humano (MJ)	46.02	1305.41	1.76E+08	1.26E-04
Consumo energético por uso de herramientas (MJ)	99.00	234.00	2.52E+06	1.26E-04
<b>DELAMINACION</b>				
Consumo por delaminación térmica (MJ)	9.31E+02	5.44E+03	7.26E+07	-
Consumo por delaminación mecánica (MJ)	205.70	1201.20	1.60E+07	1.26E-04
<b>RECUPERACION DE MATERIALES</b>				
Consumo total por recuperación por caso (MJ)	35.64	84.24	9.09E+05	1.26E-04
<b>CLASIFICACION</b>				
Consumo total (Clasificación manual) (MJ)	1.67E+01	2.01E+02	9.16E+05	1.26E-04
<b>LIXIVIACION</b>				
Consumo total por lixiviación (MJ)	4,950.00	1.17E+04	1.26E+08	1.26E-04
<b>HUELLA DE CARBONO TOTAL (tCO<sub>2</sub>)</b>	0.77	2.39	4.78E+04	

*Tabla 19: Huella de carbono total por caso*

Finalmente, con los cálculos totales de la huella de carbono para cada caso, se presentarán las conclusiones y perspectivas basadas en estos resultados en el capítulo siguiente.

## 4. CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

### 4.1. Conclusiones

#### **Evaluación cualitativa y necesidad de regulación**

En primer lugar, la evaluación cualitativa de los procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos, la cual fue desarrollada en los capítulos 1 y 2 a través de un análisis y revisión del estado del arte actual de los paneles fotovoltaicos así como de los procesos de reciclaje vigentes y emergentes de estos, revela una variabilidad significativa en términos de tecnologías utilizadas, tanto a nivel industrial y/o comercial, como experimental; sin embargo, esto evidencia una falta de consenso y regulación a nivel global. Por lo tanto, una de las conclusiones que se desprenden del trabajo realizado es la necesidad de establecer regulaciones, dispositivos y/o estándares internacionales que garanticen la seguridad ambiental y la recuperación eficiente de materiales, estos dispositivos deben tener como enfoque principal paneles fotovoltaicos como tecnología y cada subproceso del proceso de reciclaje de estos. Estas regulaciones podrían incluir la definición de requisitos, plazos y alcances del proceso de reciclaje, la especificación de métodos de medición de la huella de carbono de los procesos involucrados y la obligatoriedad de informar públicamente sobre los procesos de reciclaje utilizados y los resultados obtenidos. Sobre los procesos revisados, es posible identificar incluso variables adicionales que también están involucradas en el cálculo del EPBT y dimensionamiento de huella de carbono, como la degradación anual natural del panel, la eficiencia real del mismo, entre otras. Por otro lado, en la medida en que se diseñen nuevos paneles con el reciclaje en mente y se maximice el aprovechamiento de los materiales, se pueden minimizar los costos ambientales y económicos del reciclaje, y de esta forma favorecer la economía circular del ciclo de vida de esta tecnología. Asimismo, la economía circular puede fomentar la creación de nuevos negocios y empleos en el campo del reciclaje de paneles fotovoltaicos. En última instancia, se requiere un enfoque interdisciplinario y colaborativo que involucre a la industria, los reguladores y la sociedad en general para avanzar hacia un sistema de reciclaje de paneles fotovoltaicos más sostenible, eficiente y responsable. La adopción de regulaciones y principios de economía circular puede ayudar a lograr este objetivo y asegurar que la industria fotovoltaica siga siendo una fuente importante de energía limpia y sostenible.

## **Análisis cuantitativo y eficiencia energética**

En segundo lugar, el análisis cuantitativo realizado en el capítulo 3 mediante la evaluación del balance energético para los 3 casos de estudio escogidos en base a la capacidad de producción energética y el cálculo del EPBT asociado a la gestión al final de la vida útil de cada caso permitió asociar cuantitativamente la eficiencia de los procesos de reciclaje en términos de tiempo y el factor unidad de energía producida por unidad de energía consumida. Más allá del porcentaje de recuperación de los materiales, el cual es principalmente compuesto por el silicio, que se recupera en un porcentaje del 99.24%, y los metales de mayor valor de retorno, alambre de cobre en 99.57%, plata en un 88%, y cobre en un 99% [62]; es fundamental considerar la cantidad de energía que se consume en el proceso, ya que esto proporciona un criterio de evaluación adicional para determinar la viabilidad y sostenibilidad de los procesos de reciclaje. La utilización del concepto EPBT permitió obtener un tiempo de 2-4 meses, un detalle importante es que este valor tiende a permanecer constante de forma indistinta a los casos de estudio y sigue la misma tendencia; sin embargo, es importante tomar especial detalle por el caso de consumo energético elevado ya que a pesar de poseer un EPBT relativamente bajo, la huella de carbono en el reciclaje para este caso es de  $4.78E+04$  tCO<sub>2</sub> eq siendo un valor considerablemente elevado en contraste con los otros 2 casos; por otro lado, considerando que el consumo energético puede ser considerado a lo largo de la cadena fotovoltaica, esta cifra sugiere que la vida útil de los paneles fotovoltaicos es más corta de lo esperado, lo que podría tener implicaciones importantes para la sostenibilidad del sector en el corto, mediano y largo plazo. Cabe destacar que, si bien este cálculo no considera el desgaste natural en términos de eficiencia energética del panel fotovoltaico, debido a su complejidad y extensión, la durabilidad de los paneles sigue siendo un factor crucial para tener en cuenta en la evaluación de la sostenibilidad y factibilidad de esta tecnología en los próximos años. Por otro lado, los cálculos realizados para determinar el EPBT y la huella de carbono asociada se realizaron utilizando valores nominales, debido a las limitaciones anteriormente mencionadas; debido a esto es posible agregar diversos factores de corrección que permitan obtener un resultado más fiel y cercano a la realidad; de hecho, otros trabajos de investigación en los cuales se colaboró y fueron motivados por los resultados del presente manuscrito, utilizan técnicas más novedosas como análisis de dispersión para estimar este error inducido, sugiriendo un EPBT incluso más variable [91]. Por lo tanto, otra conclusión que se desprende es la importancia y necesidad de continuar desarrollando el estado del arte de este trabajo para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos vigentes.

## **Impacto ambiental y sostenibilidad**

En tercer lugar, respecto del impacto ambiental de los procesos de reciclaje de paneles fotovoltaicos realizado en base al cálculo de la huella de carbono asociado al consumo energético de cada caso de estudio para la gestión al final de la vida útil de los paneles utilizados, es importante diferenciar los resultados obtenidos por cada caso de estudio; los resultados del cálculo corresponden, en el caso de consumo bajo a 0.79 tCO<sub>2</sub>, una cantidad de emisiones comparable a 1 tCO<sub>2</sub> que corresponde a las emisiones de CO<sub>2</sub> tras recorrer 2500 millas en transporte particular [92] [93] donde se requieren plantar alrededor de 50 árboles en un año para mitigar el efecto negativo de estos gases; en el caso de consumo medio a 2.54 tCO<sub>2</sub>, una cantidad de emisiones comparable a 3 tCO<sub>2</sub> que representa las emisiones de CO<sub>2</sub> del consumo energético de 2 hogares en un año [93], y donde se requieren plantar alrededor de 150 árboles en un año para su mitigación; y en el caso de consumo alto a 49,800 tCO<sub>2</sub>, que corresponde a las emisiones de 129,480 vuelos Ámsterdam-Roma [93] o en un contexto americano, Buenos Aires-Santiago y donde se requieren 2.490 millones de árboles en un año para su mitigación. Estas cifras son significativas y evidencia el importante impacto que tienen los paneles fotovoltaicos en el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida, no solo durante su fase operativa, sino también durante su fase de desecho. De esta forma, se hace evidente la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles y eficientes en la gestión de los residuos de paneles fotovoltaicos, así como de promover el desarrollo de tecnologías que permitan reducir el impacto ambiental de estos procesos; por otro lado, hoy en día existen diversos artículos que buscan incentivar esta concientización ambiental, proponiendo diferentes soluciones tecnológicas más amigables que permitan acercar a los usuarios que no están tan familiarizados con estas temáticas [94]. En síntesis, es fundamental que se tome conciencia sobre la magnitud de la huella de carbono de los paneles fotovoltaicos y se promuevan prácticas más sostenibles y conscientes en su gestión y uso.

## 4.2. Perspectivas

En cuanto al desarrollo del estado del arte con relación a la evaluación de la huella de carbono y del EPBT en el proceso de reciclaje de paneles fotovoltaicos, es importante mencionar que la investigación en esta área está en constante evolución. Esto se debe a la complejidad del proceso y a la necesidad de tener en cuenta múltiples variables, tanto en la etapa de producción como en la de reciclaje. Sin embargo, esta evolución nos brinda la oportunidad de eventualmente poder contar con un cálculo más preciso y completo de la huella de carbono y del EPBT, lo que permitirá mejorar la toma de decisiones en cuanto a la implementación de tecnologías solares y su gestión de residuos.

Otro factor importante a considerar es la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y su degradación natural. Este es un tema que puede ser objeto de estudio en el futuro, ya que una mayor eficiencia de los paneles permitiría una reducción en el tiempo de recuperación de la energía invertida en la producción y una menor huella de carbono en el ciclo de vida del panel. Además, el estudio de la degradación natural de los paneles puede permitir una mejor comprensión de su durabilidad y vida útil, lo que a su vez permitiría una gestión más eficiente de los residuos.

Asimismo, es importante señalar que el presente estudio se ha centrado en el análisis de tres casos representativos de diferentes escalas de consumo energético, seleccionados por su relevancia y disponibilidad de información. Sin embargo, para fortalecer la validez estadística y la generalización de los resultados, futuras investigaciones deberían considerar la inclusión de un mayor número de instalaciones fotovoltaicas, abarcando distintas regiones y capacidades. Esto permitiría validar los hallazgos obtenidos y proporcionar una visión más robusta y representativa del impacto ambiental y la eficiencia de los procesos de reciclaje de paneles solares en diversos contextos. La ampliación de la muestra contribuiría, además, a establecer lineamientos más precisos para la gestión sostenible de estos residuos a nivel nacional e internacional.

En cuanto a las regulaciones necesarias para el proceso de reciclaje, es importante destacar que estas deben abarcar todos los aspectos del proceso, desde la recolección y transporte hasta el tratamiento y disposición final de los residuos. Además, es necesario que estas regulaciones incluyan criterios de evaluación de la huella de carbono y del EPBT, ya que esto permitiría una gestión más sostenible y eficiente de los residuos de paneles fotovoltaicos. Los requerimientos

y lineamientos que definan estos dispositivos pueden ser objeto de estudio a tomar en consideración.

Por último, es interesante considerar el efecto en términos de huella de carbono y del EPBT de los componentes que giran alrededor del panel, como los inversores y las baterías, en función del tipo de instalación que se tenga. Si bien esto puede presentar una complejidad que justifique su tratamiento como objeto de investigación independiente, permitiría una visión más completa del impacto ambiental de la tecnología solar y una mejor evaluación de su sostenibilidad.

En resumen, la investigación y el desarrollo en esta área son cruciales para lograr una gestión más sostenible de los residuos de paneles fotovoltaicos y para fomentar la transición hacia una economía más circular y baja en carbono.



# PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Como producto de esta investigación, se publicaron las siguientes producciones científicas:

1. Tipo de producción: Artículo en revista Q2  
Journal: *EPJ Photovoltaics* vol. 15

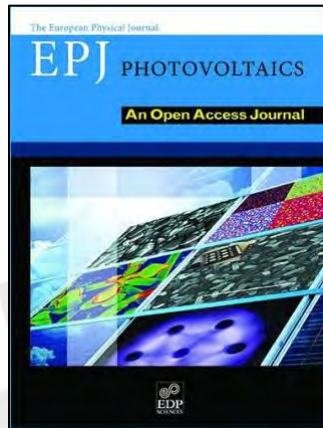


Figura 18: *EPJ Photovoltaics* Journal

Cita del artículo: M. E. A. Yovera Cortez, C. A. Paragua-Macuri, and M. Paragua Morales, “Study, qualitative-quantitative analysis, and sizing of the environmental impact of the photovoltaic panel recycling process,” *EPJ Photovoltaics*, vol. 15, p. 37, 2024, doi: 10.1051/EPJPV/2024035.[95]

DOI: <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024035>

Fecha de publicación: 25 de noviembre de 2024

2. Tipo de producción: Artículo de conferencia  
Conferencia: *IEEE International Humanitarian Technologies Conference (IHTC) 2024*



Figura 19: *IEEE International Humanitarian Technologies Conference 2024*

Cita del artículo: M. E. A. Y. Cortez, C. A. Paragua-Macuri, L. S. M. Pérez, D. A. S. Talledo, and M. P. Morales, “Contribution of the Recycling Stage to the Carbon Footprint in the Life Cycle of Photovoltaic Energy Use,” *2024 IEEE International Humanitarian Technologies Conference (IHTC)*, pp. 1–5, Nov. 2024, doi: 10.1109/IHTC61819.2024.10855080.[96]

DOI: [10.1109/IHTC61819.2024.10855080](https://doi.org/10.1109/IHTC61819.2024.10855080)

Fecha de publicación: 29 de enero de 2025

Asimismo, este trabajo colaboró para la publicación de las siguientes producciones científicas:

3. Tipo de producción: Artículo de conferencia  
Conferencia: *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*

Cita del artículo: S. H. C. Perez, M. E. Y. Cortez, C. A. Paragua-Macuri, D. A. S. Talledo, and M. P. Morales, “Dispersion analysis of the energy consumption and carbon footprint of photovoltaic energy use through design of experiments (DOE),” *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, pp. 1–8, Nov. 2024[91]

DOI: [10.1109/INTERCON63140.2024.10833500](https://doi.org/10.1109/INTERCON63140.2024.10833500)

Fecha de publicación: 14 de enero de 2025

4. Tipo de producción: Artículo de conferencia  
Conferencia: *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*

Cita del artículo: L. S. Morales Pérez, C. A. Paragua-Macuri, D. A. Sánchez Talledo, M. E. Yovera Cortez, and M. P. Morales, “Development of an Integrated Web Tool for Assessing the Energy Consumption and Carbon Footprint of the Photovoltaic Cycle: A New Perspective,” *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, pp. 1–8, Nov. 2024[94]

DOI: [10.1109/INTERCON63140.2024.10833455](https://doi.org/10.1109/INTERCON63140.2024.10833455)

Fecha de publicación: 14 de enero de 2025



Figura 20: *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio del ambiente del Perú, “Glosario de términos | Dirección General de Cambio Climático y Desertificación.” Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/glosario-de-terminos/>
- [2] M. Both, P. Reis Junior, T. I. Hentges, and M. A. F. Reis, “Photoelectric effect on concrete artifacts produced with the addition of luminescent substances and polymer residues,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2021, doi: 10.1016/J.JKSUES.2021.08.003.
- [3] F. Zhang, C. Han, M. Wu, X. Hou, X. Wang, and B. Li, “Global sensitivity analysis of photovoltaic cell parameters based on credibility variance,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 7582–7588, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.05.280.
- [4] “Glosario energético - Energía solar fotovoltaica - Ayuntamiento de Madrid.” Accessed: Sep. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Movilidad-y-transportes/Glosario-energetico/?vgnnextfmt=default&vgnextoid=25c71ec1d1cfc310VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=220e31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&idC apitulo=6551890>
- [5] M. Pulgar-Vidal Otálora *et al.*, “Glosario de Términos para la Formulación de Proyectos Ambientales”.
- [6] V. Fthenakis and M. Raugei, “Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems,” *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment*, pp. 209–232, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-1-78242-336-2.00007-0.
- [7] IRENA, “End Of Life Management Solar Photovoltaic Panels,” 2016.
- [8] L. M. Camarinha-Matos, A. I. Oliveira, F. Ferrada, and V. Thamburaj, “Collaborative services provision for solar power plants,” *Industrial Management and Data Systems*, vol. 117, no. 5, pp. 946–966, 2017, doi: 10.1108/IMDS-06-2016-0246.
- [9] R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, and C. M. Chong, “A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling,” Jul. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2019.04.020.
- [10] IRENA, “Renewable capacity highlights,” Mar. 2024, Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Highlights\\_2024.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2024.pdf)
- [11] ENERCER, “EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DE LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS”, Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <https://feriaexposolar.com/wp-content/uploads/2019/09/exposicion.pdf>
- [12] Luke Richardson, “History of Solar Energy: Timeline & Invention of Solar Panels | EnergySage.” Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <https://news.energysage.com/the-history-and-invention-of-solar-panel-technology/>
- [13] M. A. Rodríguez-Meza and J. L. Cervantes-Cota, “El efecto fotoeléctrico,” *CIENCIA ergo sum*, vol. 13, no. 3, pp. 265–270, 2006, Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <http://www.astro.inin.mx/mar>
- [14] U.S. Department of Energy, “The History of Solar,” Energy Efficiency and Renewable Energy. Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: [https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf)
- [15] Chaudhery Mustansar Hussain, “Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications,” 2018.

- [16] S. Wijewardane and L. L. Kazmerski, “Inventions, innovations, and new technologies: Flexible and lightweight thin-film solar PV based on CIGS, CdTe, and a-Si:H,” *Solar Compass*, vol. 7, p. 100053, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.SOLCOM.2023.100053.
- [17] A. Allouhi, S. Rehman, M. S. Buker, and Z. Said, “Up-to-date literature review on Solar PV systems: Technology progress, market status and R&D,” *J Clean Prod*, vol. 362, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132339.
- [18] J. Marsh, “How Much Do Solar Panels Cost? 2022 Guide | EnergySage.” Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: <https://news.energysage.com/how-much-does-the-average-solar-panel-installation-cost-in-the-u-s/>
- [19] E. Tarigan, “Financial Analysis of Solar Rooftop PV System: Case Study in Indonesia,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 13, no. 3, pp. 15–19, May 2023, doi: 10.32479/IJEEP.14214.
- [20] “Paneles solares 2022 | Los mejores precios en AutoSolar.” Accessed: Sep. 28, 2022. [Online]. Available: [https://autosolar.pe/paneles-solares?gclid=aw.ds&gclid=CjwKCAjw4c-ZBhAEEiwAZ105RdYho2yV8OD8gp\\_Lq6i2MWYXfwduu6YaHxl\\_a\\_KLnM1B80G SxBmZURoCvZgQAvD\\_BwE&gclid=aw.ds](https://autosolar.pe/paneles-solares?gclid=aw.ds&gclid=CjwKCAjw4c-ZBhAEEiwAZ105RdYho2yV8OD8gp_Lq6i2MWYXfwduu6YaHxl_a_KLnM1B80G SxBmZURoCvZgQAvD_BwE&gclid=aw.ds)
- [21] MINAM, “Ley de Promoción y Utilización de los Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en Zonas Rurales, Aisladas y de Frontera del País”.
- [22] M. U. Manoo, F. Shaikh, L. Kumar, and S. I. Mustapa, “Comparative Investigation of On-Grid and Off-Grid Hybrid Energy System for a Remote Area in District Jamshoro of Sindh, Pakistan,” *Urban Science 2023, Vol. 7, Page 63*, vol. 7, no. 2, p. 63, Jun. 2023, doi: 10.3390/URBANSCI7020063.
- [23] HG Ingeniería y Construcciones S.A.S energía solar, “Tipos de instalación de energía solar fotovoltaica.” Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: <https://hgingeneria.com.co/tipos-de-instalacion-de-energia-solar-fotovoltaica/>
- [24] Clean Energy Reviews, “How solar power works - on-grid, off-grid and hybrid systems — Clean Energy Reviews.” Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works>
- [25] “Vista de El efecto global de la actual revolución tecnológica 4ª revolución industrial y la industria 4.0 en acción.” Accessed: Sep. 28, 2022. [Online]. Available: <https://revistageon.unillanos.edu.co/index.php/geon/article/view/194/211>
- [26] C. Farrell *et al.*, “Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules,” *Scientific Reports 2019 9:1*, vol. 9, no. 1, pp. 1–13, Mar. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-41762-5.
- [27] X. Wang, Y. Lu, C. Chen, X. Yi, and H. Cui, “Total-factor energy efficiency of ten major global energy-consuming countries,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 137, pp. 41–52, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.JES.2023.02.031.
- [28] H. H. Sharaf-Addin, “Towards net-zero carbon emissions: A systematic review of carbon sustainability reporting based on GHG protocol framework,” *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 24, p. 100516, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.INDIC.2024.100516.
- [29] Hersayn Alejandro Zárate Torres, “Automatización en edificios inteligentes .” Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.mundohvacr.com.mx/2013/05/automatizacion-en-edificios-inteligentes/>
- [30] Loreto Inés Roás Valera, “Los vehículos eléctricos,” Nov. 2011.
- [31] United Nations Framework Convention on Climate Change, “Paris Agreement Spanish,” 2015, Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf)

- [32] International Organization for Standardization, “ISO 14001 - Introduction to ISO 14001:2015,” 2015, Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100371.pdf>
- [33] “Energía - Desarrollo Sostenible.” Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [34] “Cambio climático - Desarrollo Sostenible.” Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [35] The International REC Standard, “I-REC Standard.” Accessed: Jan. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.irecstandard.org/about-us/>
- [36] Ministerio de Energía y Minas, “DECRETO LEGISLATIVO DE PROMOCIÓN DE LA INVERSIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES,” 2010, Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: [https://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-9ozj22z9ap5zz33z-DL\\_de\\_promocion\\_de\\_la\\_inversion\\_para\\_la\\_generacion\\_de\\_electricidad\\_con\\_el\\_uso\\_de\\_energias\\_renovables\\_1002.pdf](https://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-9ozj22z9ap5zz33z-DL_de_promocion_de_la_inversion_para_la_generacion_de_electricidad_con_el_uso_de_energias_renovables_1002.pdf)
- [37] MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DIRECCIÓN GENERAL DE ELECTRICIDAD, “NORMA DGE ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y SUS COMPONENTES PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL,” 2015, Accessed: Jan. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/EETT%20Sistemas%20Fotovoltaicos%20y%20Componentes.pdf>
- [38] E. Ramos, “La generación distribuida: El camino hacia la producción descentralizada de electricidad y pautas para su reglamentación,” *Forseti*, vol. 8, pp. 7–35, 2020, Accessed: Jan. 14, 2023. [Online]. Available: <https://revistas.up.edu.pe/index.php/forseti/article/view/1255/1414>
- [39] M. Enrique, F. Medina, and U. De Cartagena, “DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE PAPEL RECICLADO ECOLÓGICO A ESCALA LABORATORIO USANDO PERÓXIDO DE HIDRÓGENO CINDY MILENA LEÓN NIETO”.
- [40] “Tipos de reciclaje y en qué consisten - Reciclados La Trinchera.” Accessed: Sep. 29, 2022. [Online]. Available: <https://recicladoslalatrinchera.com/tipos-de-reciclaje-y-en-que-consisten/>
- [41] Q. Pastor, “RECICLADO DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS Autor: GUTIÉRREZ CASTILLO, TERESA Tutor(es)”.
- [42] MINAM, “Reglamento Nacional para la Gestión y Manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.” Accessed: Sep. 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/REGLAMENTO-RAEE-X5.pdf>
- [43] P. Majewski *et al.*, “Recycling of solar PV panels- product stewardship and regulatory approaches,” *Energy Policy*, vol. 149, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2020.112062.
- [44] “Electrotec | ¿CÓMO FUNCIONA UN PANEL SOLAR?” Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <https://electrotec.pe/blog/PanelesSolares>
- [45] “The structure of a photovoltaic module - ECOPROGETTI - Specialist in photovoltaic production process.” Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <https://ecoprogetti.com/the-structure-of-photovoltaic-module/>
- [46] M. Mónica, S. Céspedes, C. Luisa Vásquez Stanescu, and R. Ramírez-Pisco, “Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas Final disposal and environmental impact of photovoltaic cells,” *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol. 14, pp. 74–90, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.36089.60004/1.

- [47] “Silicio la materia prima preferida en los paneles solares.” Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: [https://ae-solar.mx/silicio-en-los-paneles-solares/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=silicio-en-los-paneles-solares](https://ae-solar.mx/silicio-en-los-paneles-solares/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=silicio-en-los-paneles-solares)
- [48] “Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL.” Accessed: Nov. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>
- [49] D. Hofman and A. E. García Rosselli, “Efecto fotoeléctrico”.
- [50] “Efecto Fotoelectrico y Fotovoltaico. Explicación y Aplicaciones.” Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-fotoelectrico.html>
- [51] J. C. Díaz-Guillén, M. A. Jiménez, and M. Osorio, “MODELADO Y SIMULACIÓN DE CELDAS Y PANELES SOLARES,” 2014, doi: 10.13140/2.1.4192.8968.
- [52] “Efecto fotovoltaico. Qué es y cómo se produce | Renovables Verdes.” Accessed: Oct. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.renovablesverdes.com/efecto-fotovoltaico/>
- [53] “Mapas de recursos solares y datos GIS para más de 180 países | Solargis.” Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/peru>
- [54] M. Sodhi, L. Banaszek, C. Magee, and M. Rivero-Hudec, “Economic Lifetimes of Solar Panels,” *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 782–787, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.PROCIR.2022.02.130.
- [55] “Most efficient solar panels 2022 — Clean Energy Reviews.” Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>
- [56] “GARANTÍA LIMITADA PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SERIE KU&HIKU”, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: [www.csisolar.com](http://www.csisolar.com)
- [57] “Garantía-de-producto-y-potencia-de-módulos-fotovoltaicos-comerciales-PERFORMANCE”.
- [58] G. Takyi and O. G. Laryea, “Comparative study of the performance of solar photovoltaic module technologies installed in Kumasi, Ghana, in Sub-Saharan Africa,” *Sci Afr*, vol. 13, p. e00877, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.SCIAF.2021.E00877.
- [59] L. Lillo-Sánchez, G. López-Lara, J. Vera-Medina, E. Pérez-Aparicio, and I. Lillo-Bravo, “Degradation analysis of photovoltaic modules after operating for 22 years. A case study with comparisons,” *Solar Energy*, vol. 222, pp. 84–94, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.026.
- [60] B. Aboagye, S. Gyamfi, E. A. Ofori, and S. Djordjevic, “Degradation analysis of installed solar photovoltaic (PV) modules under outdoor conditions in Ghana,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 6921–6931, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.10.046.
- [61] J. A. P. López, C. A. Paragua-Macuri, D. A. M. Aucaruri, J. R. A. Abanto, and J. A. Töfflinger, “Classification of solar panel technology and photovoltaic cell status applying machine learning to electroluminescence images,” *2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 2024*, pp. 121–126, 2024, doi: 10.1109/MELECON56669.2024.10608551.
- [62] X. Wang, X. Tian, X. Chen, L. Ren, and C. Geng, “A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 248, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2022.111976.
- [63] P. Dias *et al.*, “Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination – technical, environmental and economic analyses,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 165, p. 105241, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2020.105241.

- [64] R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, and C. M. Chong, “A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 532–550, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.04.020.
- [65] A. Doni and F. Dughiero, “Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling,” *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 757–762, 2012, doi: 10.1109/PVSC.2012.6317715.
- [66] M. M. Lunardi, J. P. Alvarez-Gaitan, J. I. Bilbao, and R. Corkish, “A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules,” *Solar Panels and Photovoltaic Materials*, Jul. 2018, doi: 10.5772/INTECHOPEN.74390.
- [67] Y. Kim and J. Lee, “Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 98, pp. 317–322, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2011.11.022.
- [68] F. Baumgartner, *Photovoltaic (PV) balance of system components: Basics, performance*. Woodhead Publishing, 2017. Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9781782423362/the-performance-of-photovoltaic-pv-systems>
- [69] A. Balaguera, G. I. Carvajal, J. Albertí, and P. Fullana-I-Palmer, “Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review,” 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.003.
- [70] T. Silalertruksa and S. H. Gheewala, “Land–Water–Energy Nexus of Biofuels Development in Emerging Economies: A Case Study of Bioethanol Policy in Thailand,” *The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy: Resources, Technologies, Sustainability and Policy*, pp. 379–402, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-813056-8.00008-X.
- [71] G. EL Para Cálculo De La Huella De Carbono Y Para La Elaboración De Un Plan De Mejora De Una Organización, “Ministerio para la Transición Ecológica”, Accessed: Nov. 08, 2022. [Online]. Available: <http://publicacionesoficiales.boe.es/>
- [72] Intergovernmental Panel on Climate Change, “IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES,” 2019, Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/0\\_Overview/19R\\_V0\\_01\\_Overview.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/0_Overview/19R_V0_01_Overview.pdf)
- [73] United States Environmental Protection Agency, “Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2020 – Main Text,” 2020, Accessed: Feb. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/draft-inventory-us-greenhouse-gas-emissions->
- [74] D. A. S. Talledo, C. A. P. Macuri, M. P. Morales, and M. G. P. Macuri, “Study, analysis qualitative-quantitative and carbon footprint impact from photovoltaic energy use,” *Proceedings of the 2022 IEEE 29th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2022*, 2022, doi: 10.1109/INTERCON55795.2022.9870097.
- [75] D. A. S. Talledo, C. A. P. Macuri, M. P. Morales, and M. G. P. Macuri, “Análisis cualitativo y dimensionamiento del impacto ambiental del uso de la Energía Fotovoltaica: 3 Casos de estudio en el Perú,” *TECNIA*, vol. 33, no. 1, pp. 34–41, Jul. 2023, doi: 10.21754/TECNIA.V33I1.1548.
- [76] “INTEGRATED MONOCRYSTALLINE SOLAR PANEL UFX120PM Uflex Energia.” Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://uflexenergia.it/en/product/ufx120pm/>
- [77] “RSM72-6-320P-340P/4BB.” Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Crystalline/5a9f79ad5b432.pdf>

- [78] ENGIE energías Perú, “Sistema de energía solar en Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.” Accessed: Apr. 05, 2023. [Online]. Available: <https://engie-energia.pe/notas-de-prensa/engie-implementa-sistema-solar-iimp>
- [79] Osinergmin, “INFORMACIÓN TÉCNICA DE PROYECTOS DE CENTRALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA NO CONVENCIONAL CON ESTUDIOS DE PRE OPERATIVIDAD APROBADOS POR EL COES,” Lima, Feb. 2023. Accessed: Apr. 05, 2023. [Online]. Available: [https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/electricidad/Documentos/Publicaciones/Compendio-Proyectos-CGENC-EPO-aprobados-COES.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/Publicaciones/Compendio-Proyectos-CGENC-EPO-aprobados-COES.pdf)
- [80] “BACKSHEET MONOCRYSTALLINE MODULE 405 W+,” 2021, Accessed: Apr. 05, 2023. [Online]. Available: [www.trinasolar.com](http://www.trinasolar.com)
- [81] “Global Solar Atlas.” Accessed: Apr. 05, 2023. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?s=-12.090177,-76.922338&m=site&c=-12.090177,-76.922338,11>
- [82] “INTEGRATED MONOCRYSTALLINE SOLAR PANEL UFX120PM Uflex Energia.” Accessed: May 28, 2023. [Online]. Available: <https://uflexenergia.it/en/product/ufx120pm/>
- [83] Division de Supervision de Electricidad (DSE) - Osignermin, “FICHAS TÉCNICAS DE CENTRALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.” Accessed: May 28, 2023. [Online]. Available: [https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/electricidad/Documentos/generacion/1.Fichas\\_Tecnicas\\_Centrales\\_Operacion.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/generacion/1.Fichas_Tecnicas_Centrales_Operacion.pdf)
- [84] “Sierra circular 7-1/4 1500 W, profesional, Truper, Sierras Circulares, 11004.” Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.truper.com/sierra-circular-7-1-4-profesional-1500-w.html>
- [85] “Ficha técnica Rotomartillo 1/2" 750 W, profesional.” Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: [https://www.truper.com/ficha\\_tecnica/Rotomartillo-1-2-profesional-700-W-3672.html](https://www.truper.com/ficha_tecnica/Rotomartillo-1-2-profesional-700-W-3672.html)
- [86] “Pistola de calor 1500 W, profesional, Truper, Pistolas De Calor, 17279.” Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.truper.com/pistola-de-calor-profesional-1500-w.html>
- [87] R. Chavarría, C. Ingeniero, and T. Eléctrico, “NTP 177: La carga física de trabajo: definición y evaluación Physical work load: definition and measurement La charge physique de travail: définition et evaluation Redactor”.
- [88] A. Sharma, S. Pandey, and M. Kolhe, “Global review of policies & guidelines for recycling of solar pv modules,” *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 8, no. 5, pp. 597–610, Sep. 2019, doi: 10.12720/SGCE.8.5.597-610.
- [89] “Molino de corte SM 200.” Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-corte/sm-200/>
- [90] “Retsch Test report 10644.” Accessed: Apr. 06, 2023. [Online]. Available: [www.retsch.com](http://www.retsch.com)
- [91] S. H. C. Perez, M. E. Y. Cortez, C. A. Paragua-Macuri, D. A. S. Talledo, and M. P. Morales, “Dispersion analysis of the energy consumption and carbon footprint of photovoltaic energy use through design of experiments (DOE),” *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, pp. 1–8, Nov. 2024, doi: 10.1109/INTERCON63140.2024.10833500.
- [92] “How much is a ton of carbon dioxide? | MIT Climate Portal.” Accessed: Jun. 24, 2023. [Online]. Available: <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-ton-carbon-dioxide>

- [93] “What exactly is 1 tonne of CO<sub>2</sub>? We make it tangible. - Climate Neutral Group.” Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.climateneutralgroup.com/en/news/what-exactly-is-1-tonne-of-co2/>
- [94] L. S. Morales Pérez, C. A. Paragua-Macuri, D. A. Sánchez Talledo, M. E. Yovera Cortez, and M. P. Morales, “Development of an Integrated Web Tool for Assessing the Energy Consumption and Carbon Footprint of the Photovoltaic Cycle: A New Perspective,” *2024 IEEE XXXI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, pp. 1–8, Nov. 2024, doi: 10.1109/INTERCON63140.2024.10833455.
- [95] M. E. A. Yovera Cortez, C. A. Paragua-Macuri, and M. Paragua Morales, “Study, qualitative-quantitative analysis, and sizing of the environmental impact of the photovoltaic panel recycling process,” *EPJ Photovoltaics*, vol. 15, p. 37, 2024, doi: 10.1051/EPJPV/2024035.
- [96] M. E. A. Y. Cortez, C. A. Paragua-Macuri, L. S. M. Pérez, D. A. S. Talledo, and M. P. Morales, “Contribution of the Recycling Stage to the Carbon Footprint in the Life Cycle of Photovoltaic Energy Use,” *2024 IEEE International Humanitarian Technologies Conference (IHTC)*, pp. 1–5, Nov. 2024, doi: 10.1109/IHTC61819.2024.10855080.

